



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

**Análisis cinemático de dos taludes de macizo rocoso en la ciudad de
Loja para conocer su grado de estabilidad.**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Maza Guachisaca, Marjorie Michelle.

DIRECTOR: Soto Luzuriaga, John Egverto, Mgtr.

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2017

APROBACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

MAGISTER.

John Egverto Soto Luzuriaga

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: **Análisis cinemático de dos taludes de macizo rocoso en la ciudad de Loja para conocer su grado de estabilidad**, realizado por **Maza Guachisaca Marjorie Michelle**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Abril 2017

f).....

Mgtr. Jhon Egverto Soto Luzuriaga

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, **Maza Guachisaca Marjorie Michelle**, declaro ser autora del presente trabajo de titulación: **Análisis cinemático de dos taludes de macizo rocoso en la ciudad de Loja para conocer su grado de estabilidad**, de la Titulación de Geología y Minas, siendo **Mgtr. John Egverto Soto Luzuriaga** director del presente trabajo; y eximo expresarme a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigación, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).....

Maza Guachisaca Marjorie Michelle

1106047283

DEDICATORIA

A mis padres, Limber Maza y Martha Guachisaca, por haber estado siempre brindándome su apoyo incondicional para llegar a esta instancia de mis estudios.

A mis hermanos, Bryan, Santiago y Alejandra, porque siempre han estado presentes acompañándome y animándome.

A mis amigas del alma, Silvia, Dayana y Gabriela, por hacer de mi vida universitaria la mejor con sus conocimientos, ocurrencias y consejos. Siempre las cuatro.

De manera especial la dedico a mi Doctora Favorita, Dra. Patricia Naranjo, por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por guiarme y fortalecerme durante este camino.

A mi Director de Tesis, Mgtr. John Soto, por haberme brindado siempre sus conocimientos y por haber tenido la paciencia más grande del mundo para guiarme durante el desarrollo de este proyecto.

A mi maestro, Ing. José Arturo Guartán, por sus enseñanzas, consejos y ayuda desinteresada.

A todos los docentes de la Titulación de Geología y Minas por ayudar en mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

APROBACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
JUSTIFICACIÓN	4
ALCANCE.....	5
OBJETIVOS	6
GENERAL	6
ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO I.....	7
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA ZONA	7
1.1 Ubicación y acceso.....	8
1.2 Clima y vegetación	8
1.3 Geología Regional.....	9
1.4 Hidrografía.....	12
CAPÍTULO II.....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Mecánica de rocas.....	14
2.2 Caracterización de un Macizo Rocosos.....	14
2.2.1. Macizos rocosos.....	15
2.2.2. Propiedades de la Matriz Rocosa	15
2.2.3. Discontinuidades	15
2.2.3.1. Tipos de discontinuidades	16
2.2.4. Características de discontinuidades	17
2.2.5. Aspectos a considerar en la caracterización de un macizo	19
2.3. Mecanismos principales de rotura de un talud.....	20
2.4. Métodos de Clasificación Geomecánica de Macizos Rocosos.....	21
2.4.1. Índice de Calidad de las Roca o RQD.....	21
2.4.2. Rock Mass Rating o RMR.....	22
2.4.3. Slope Mass Rating o SMR.....	22
2.4.4. Índice Q de Barton.....	23

2.4.5.	Geological Strength Index o GSI.....	24
2.5.	Estabilidad de taludes.....	25
2.6.	Resistencia al Corte de Discontinuidades.....	25
2.7.	Programa DIPS 6.0.....	26
2.8.	Análisis Estereográfico.	26
2.9.	Caracterización de Movimientos de Ladera.	27
2.9.1.	Movimientos de ladera.....	27
2.9.2.	Causas de los movimientos de ladera.	27
2.10.	Reconocimientos Generales.....	28
2.11.	Tipos de deslizamientos.	28
2.12.	Parámetros para la Caracterización de los Movimientos de Ladera.....	31
CAPÍTULO III.....		32
METODOLOGIA.....		32
3.1.	Levantamiento Geológico.....	33
3.2.	Obtención de datos geomecánicos.....	33
3.3.	Proyección estereográfica.....	34
3.4.	Análisis cinemático de taludes en roca.	34
3.4.1.	Modelos típicos de rotura.....	35
3.5.	Clasificaciones Geo-Mecánicas.....	36
3.5.1.	Clasificación RQD (1964).	36
3.5.2.	Clasificación RMR (1989).	37
3.5.2.1.	Resistencia a la compresión simple (Martillo de Schmidt)	37
3.5.2.2.	Índice de calidad de la roca, "RQD" (1964).	38
3.5.2.3.	Espaciado de las discontinuidades.....	38
3.5.2.4.	Estado de las juntas.	38
3.5.2.5.	Presencia de agua.....	38

3.5.3.	Clasificación SMR (1985).	38
3.5.4.	Índice “Q” de Barton (1974).	39
3.6.	Caracterización del deslizamiento	39
CAPITULO IV		40
RESULTADOS		40
4.1.	Geología local de la zona de estudio	41
4.2.	Análisis del macizo rocoso.	44
4.2.1.	Características de las discontinuidades	45
4.2.1.1.	Rugosidad.	46
4.2.1.2.	Continuidad.	46
4.2.1.3.	Abertura.	47
4.2.1.4.	Espaciado.	48
4.2.1.5.	Relleno.	48
4.2.1.6.	Alteración.	48
4.3.	Análisis de estabilidad mediante el programa DIPS 6.0.	49
4.4.	Clasificación geomecánica del macizo rocoso	51
4.4.1.	Clasificación RMR.	51
4.4.2.	Clasificación SMR.	55
4.4.3.	Clasificación de Barton, Índice “Q” (1974)	57
4.4.4.	Clasificación GSI.	57
4.5.	Caracterización del movimiento de ladera	58
CONCLUSIONES		61
RECOMENDACIONES		62
BIBLIOGRAFÍA		63
ANEXOS		65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.	8
Figura 2. Columna Estratigráfica de la Cuenca de Loja.....	11
Figura 3. Mapa Hidrográfico de la Zona de Estudio.....	12
Figura 4. Representación esquemática de las propiedades de las discontinuidades (Hudson, 1989).	18
Figura 5. Ejemplos de las características de las discontinuidades: a) Orientación. b) Espaciado. c) Resistencia de las paredes de la discontinuidad.	19
Figura 6. Estimación del GSI basado en descripciones geológicas (Hoek y Brown, 1997).	24
Figura 7. Interfaz del software DIPS 6.0.	26
Figura 8. Tipos de roturas en macizos rocosos y su representación estereográfica.....	36
Figura 9. Mapa geológico del área de estudio.	44
Figura 10. Análisis estereográfico del Talud 1. Rotura en cuña 30 NE.	50
Figura 11. Análisis estereográfico del Talud 2. Rotura en cuña.	50
Figura 13: A) Escarpe principal del movimiento de ladera de tipo Rotacional. B) y C) Movimientos de ladera múltiples de menor tamaño.....	59
Figura 14. Mapa del Movimiento de ladera en la zona de estudio.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.....	16
Tabla 2. Tipos de discontinuidades.	17
Tabla 3. Mecanismos de rotura en un talud.	20
Tabla 4: Métodos de Clasificación de macizos rocosos.....	21
Tabla 5: Índice de calidad de la roca.....	22
Tabla 6. Clasificación de los deslizamientos.	29
Tabla 7. Glosario para la caracterización de movimiento en masa.	31
Tabla 8. Familias de discontinuidades de los macizos rocosos.	46
Tabla 9. Rugosidad en las discontinuidades de los taludes 1 y 2.	46
Tabla 10. Continuidad de las diaclasas medidas en un rango de continuidad.	47
Tabla 11. Abertura de los sistemas de diaclasas para los taludes 1 y 2.....	47
Tabla 12. Relleno de las familias de discontinuidades de los taludes 1 y 2.....	48
Tabla 13. Parámetros obtenidos a partir del martillo de Schmidt.....	51
Tabla 14. Condiciones de las discontinuidades del Talud 1.....	53
Tabla 15. Condiciones de las discontinuidades del Talud 2.....	53
Tabla 16. Valoración total del Talud 1.	54
Tabla 17. Valoración total del Talud 2.	54
Tabla 18. Índice "SMR" del Talud 1.	55
Tabla 19. Índice "SMR" del talud 2.	56
Tabla 20. Parámetros del Índice "Q" del Talud 1 y 2.....	57
Tabla 21: Resultados de los Sistemas de Clasificación.....	58

RESUMEN

El trabajo de investigación presenta las características geo-mecánicas y la calidad de los macizos rocosos ubicados en el Barrio Teneria de la ciudad de Loja, donde el análisis de los resultados obtenidos permite obtener una visión real del estado del talud.

La clasificación geomecánica se realizó aplicando los siguientes métodos: Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), Slope Mass Rating (SMR), Geological Strength Index (GSI) y "Q" de Barton, con los cuales se determinó la calidad del macizo. El grado de calidad está controlada por el número de familias de diaclasas, meteorización, litología, factores hidrológicos, resistencia a la compresión y procesos antrópicos. El RQD determinó la calidad del Talud 1 como Buena y para el Talud 2 como Regular. El RMR para el Talud 1 como Buena y la del Talud 2 como Media. El SMR clasificó ambos Taludes como Buena y estable, el GSI los clasificó como fracturada e irregular y el Q de Barton para el Talud 1 como Muy Mala y al Talud 2 como Mala. La rotura para ambos taludes es en forma de cuña.

Palabras Clave: macizo rocoso, estabilidad, taludes.

ABSTRACT

The research work presents the geo - mechanical characteristics and the quality of the rocky mass located in the Teneria neighborhood in the Loja city, where the analysis of the results obtained allows a real view of the state of the slope.

The geomechanical classification was performed using the following methods: Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), Slope Mass Rating (SMR), Geological Strength Index (GSI) and Barton's "Q" System, which determined the quality of the rock mass. The degree of quality is controlled by the number of families of diachases, weathering, lithology, hydrological factors, resistance to compression and anthropic processes. The RQD determined the quality of Slope 1 as Good and Slope 2 as Regular. The RMR determined the quality of Slope 1 as Good and Slope 2 as Mean, the SMR classified both Slopes as Good and stable, the GSI classified them as fractured and irregular, and Barton's Q from the Slope 1 as Very Bad and Slope 2 as Bad. The break for both slopes is wedge-shaped.

Keywords: Rock mass, stability, slopes.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación trata sobre el análisis cinemático de dos macizos rocosos ubicados en la ciudad de Loja, con el propósito de determinar el comportamiento geomecánico y la calidad del macizo con la finalidad de realizar un diagnóstico de los problemas y el grado de estabilidad en la zona de estudio.

Para tales fines, este estudio se fundamenta en el análisis in situ de los diferentes parámetros geomecánicos para la descripción de macizos rocosos modificados de Gonzalez de Vallejo et al. (2002), y criterios basados en Deere (1964), Bieniawsk (1989), Hoek and Brown (1966), entre otros. El presente trabajo consta de cuatro capítulos.

El capítulo uno denominado “Características físico-geográficas de la zona” corresponde a la ubicación geográfica, accesos, clima, vegetación, geología regional e hidrología de la zona de estudio.

El capítulo dos “Marco teórico” engloba la fundamentación teórica, detallándose los parámetros, aspectos mecánicos del macizo rocoso y los principales mecanismos de rotura del talud para la caracterización del mismo. De igual manera se describen los parámetros para la identificación de los movimientos de ladera.

El capítulo tres “Metodología” detalla todos los pasos para determinar en campo las características geomecánicas de los macizos como: orientación, rugosidad, relleno, meteorización, resistencia y filtraciones. Además, muestra el desarrollo del proceso en el programa DIPS 6.0 para la identificación del tipo de rotura y clasificación de la estabilidad de los taludes.

El capítulo cuatro presenta los resultados obtenidos en este trabajo de investigación: la descripción de la geología local, análisis cinemático de los dos taludes, caracterización de las discontinuidades, análisis de estabilidad en el programa DIPS 6.0, la clasificación geomecánica de los dos macizos por diferentes métodos y la caracterización del movimiento de ladera.

Posteriormente se presentan las conclusiones en base a los objetivos propuestos en la investigación. Finalmente se muestra los anexos que contienen las fichas con las descripciones realizadas in-situ del movimiento de ladera y caracterizaciones geomecánicas de los taludes.

JUSTIFICACIÓN

Generalmente en el Ecuador y más específicamente en la Región Sur existen un sinnúmero de problemas relacionados con la afectación de obras civiles por eventos geológicos de diferente tipo, como: fallas, sismos, movimientos de ladera, inestabilidad de taludes, etc.

En Loja a menudo existe inestabilidad de taludes que afectan con frecuencia a obras viales principalmente, ocasionando pérdidas económicas, de infraestructura, y ocasionan accidentes de tránsito, etc. Por lo tanto, es importante realizar un análisis cinemático de los macizos rocosos que involucran taludes de vía, con la finalidad de realizar un estudio detallado de sus fracturas y de sus características geométricas y mecánica, su clasificación geomecánica y cinemática.

Conjuntamente con el análisis de los dos taludes se realizó la caracterización de un movimiento de ladera que se encuentra afectando la estabilidad de los macizos rocosos, esta nos permitió conocer el tipo de movimiento y las posibles causas. La realización de este análisis ayuda a la toma de decisiones y acciones que garanticen la estabilidad y mantenimiento de los taludes para evitar graves problemas.

ALCANCE

Este proyecto estudia la estabilidad de dos taludes rocosos, su composición, y principales características geomecánicas, determinando así el peligro actual para posteriormente plantear recomendaciones de estabilización y seguridad. Por otra parte, el estudio abarca también caracterizar un movimiento de ladera en la misma zona, debido a que el mismo se encuentra afectando a más del talud uno, la principal vía de acceso, por ello se lo analizó con el fin de conocer el tipo y los factores que den lugar al origen y desencadenamiento del mismo.

OBJETIVOS

GENERAL

- Análisis cinemático y condiciones de estabilidad de macizos rocosos paralelamente con el análisis de movimiento de ladera en la ciudad de Loja.

ESPECÍFICOS

- Describir las propiedades geológicas del lugar de estudio.
- Determinar las propiedades del macizo mediante la toma de valores de resistencia de la matriz rocosa.
- Mapear sistemáticamente el macizo rocoso para determinar la ubicación de las discontinuidades, fallas, fracturas.
- Determinar el grado de estabilidad de los taludes.
- Identificar las causas del movimiento de ladera.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA ZONA

1.1 Ubicación y acceso

El área de estudio se encuentra ubicada al Sur del Ecuador, en la provincia de Loja, en el cantón Loja, en la parte Noroccidental de la ciudad de Loja (Figura 1), en el Barrio Cisol - Teneria. El área de estudio cubre una superficie de 1.104 km².

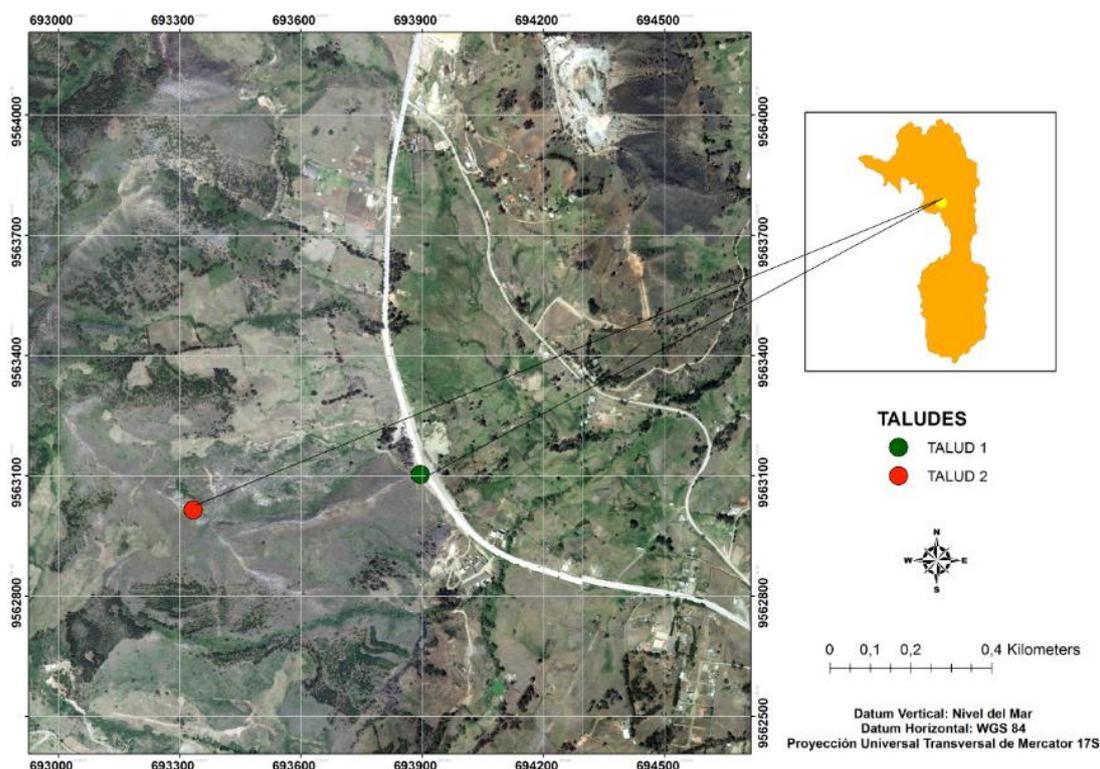


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.
Elaboración: El Autor.

La ciudad de Loja ubicada al Sur de los Andes Ecuatorianos tiene una topografía de relieve irregular, se ubica en la parte céntrica del Valle de Cuxibamba. La ciudad se encuentra a una altura aproximada de 2100 m.s.n.m. El acceso hacia la zona de estudio se lo puede realizar a través de la carretera Panamericana que conduce desde Loja hacia Cuenca.

1.2 Clima y vegetación

La ciudad de Loja goza de un clima temperado-ecuatorial subhúmedo la mayor parte del año, siendo los meses de Febrero a Mayo los más húmedos. Las temperaturas varían entre 16°C y 21°C. Generalmente en el día las temperaturas son bastante altas, pero en la tarde estas bajan mucho ofreciendo noches muy frías. Los factores que dan

origen al clima de la ciudad de Loja son los mismos factores que afectan a la región andina, especialmente la latitud y el relieve. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2007)

La vegetación en general en la hoya de Loja se encuentra básicamente representada por dos tipos que son característicos de acuerdo a la ubicación en la que se encuentran: el uno como bosque de montaña baja, que está constituido por diversas colinas en los que se encuentran plantaciones de aliso, pino, eucalipto y diversos pastizales. El otro tipo de vegetación baja ubicado en valles y llanuras se encuentran principalmente cultivos de hortalizas, cereales, frutales y árboles ornamentales, etc. y áreas urbanizadas de la ciudad de Loja (Guamán Jaramillo , 2012)

1.3 Geología Regional

La Cuenca de Loja, está conformada por una secuencia sedimentaria de tipo tectónico muy variada (Figura 2), depositada sobre un basamento metamórfico en la que se desarrollaron dos diferentes secuencias de depositación y además se desarrollaron en dos áreas diferentes con edades similares Oligoceno – Mioceno (Hungerbuhler, y otros, 2002).

Según Hungerbuhler et al. (2002), litológicamente de muro a techo la Cuenca de Loja se describe:

- **Formación Chiguinda.**- Constituyen el basamento de la cuenca de Loja el mismo que contiene rocas metamórficas de edad Paleozoica, de tipo filitas, esquistos, cuarcitas, pizarras y metacuarcitas.
- **Formación Trigal.**- De edad Miocena Media, formada por areniscas de grano grueso con láminas finas de conglomerados y capas menores de limonitas. Las areniscas muestran estratificación cruzada. La potencia varía cerca de 50m en el Oeste y a 150 m en el Este.
- **Formación La Banda.**- Formado por un estrato de 10 a 20m de potencia con secuencia intercalada desde Caliza masivas, lutitas carbonatadas, capas de chert y areniscas de grano fino.
- **Formación Belén.**- Se asume una edad del Mioceno Inferior, caracterizada por gruesas capas de areniscas marrón de grano granuloso, las mismas que muestran estratificación cruzada en escalas métricas, además contiene lentes

de conglomerado horizontalmente estratificados. Su máximo espesor 300m está en contacto concordante con la Formación La Banda.

- **Formación San Cayetano.** - La formación puede ser dividida en tres miembros con límites transicionales:
 - El **miembro inferior** de areniscas, contienen capas de areniscas y algunas pequeñas capas de conglomerados y varias capas de carbón.
 - Un **miembro intermedio** del miembro de limonitas contiene lutitas laminadas de color gris y blanco, con abundantes capas de diatomita y algunos piroclastos horizontales, con una rica microflora y gastrópodos.
 - El **miembro superior** de areniscas tiene una litología similar a la intermedia, pero generalmente muestran una tendencia de depositación estrato creciente. Tiene una edad del Mioceno Tardío a último.

- **Formación Quillollaco.**- Esta presente al Este y Oeste de la cuenca de Loja, sobrepuesto al resto de formaciones por una discordancia angular. La formación alcanza espesores hasta un máximo de 600m, al este de la ciudad de Loja. La formación está dominada por conglomerados muy granulados con pocas intercalaciones de areniscas.

- **Formación Salapa.**- La formación Salapa descansa discordantemente en rocas metamórficas Paleozoicas Contiene clastos líticos y tobas ricos en vidrio (transformados a caolinita), formación más joven de edad Pliocénico.

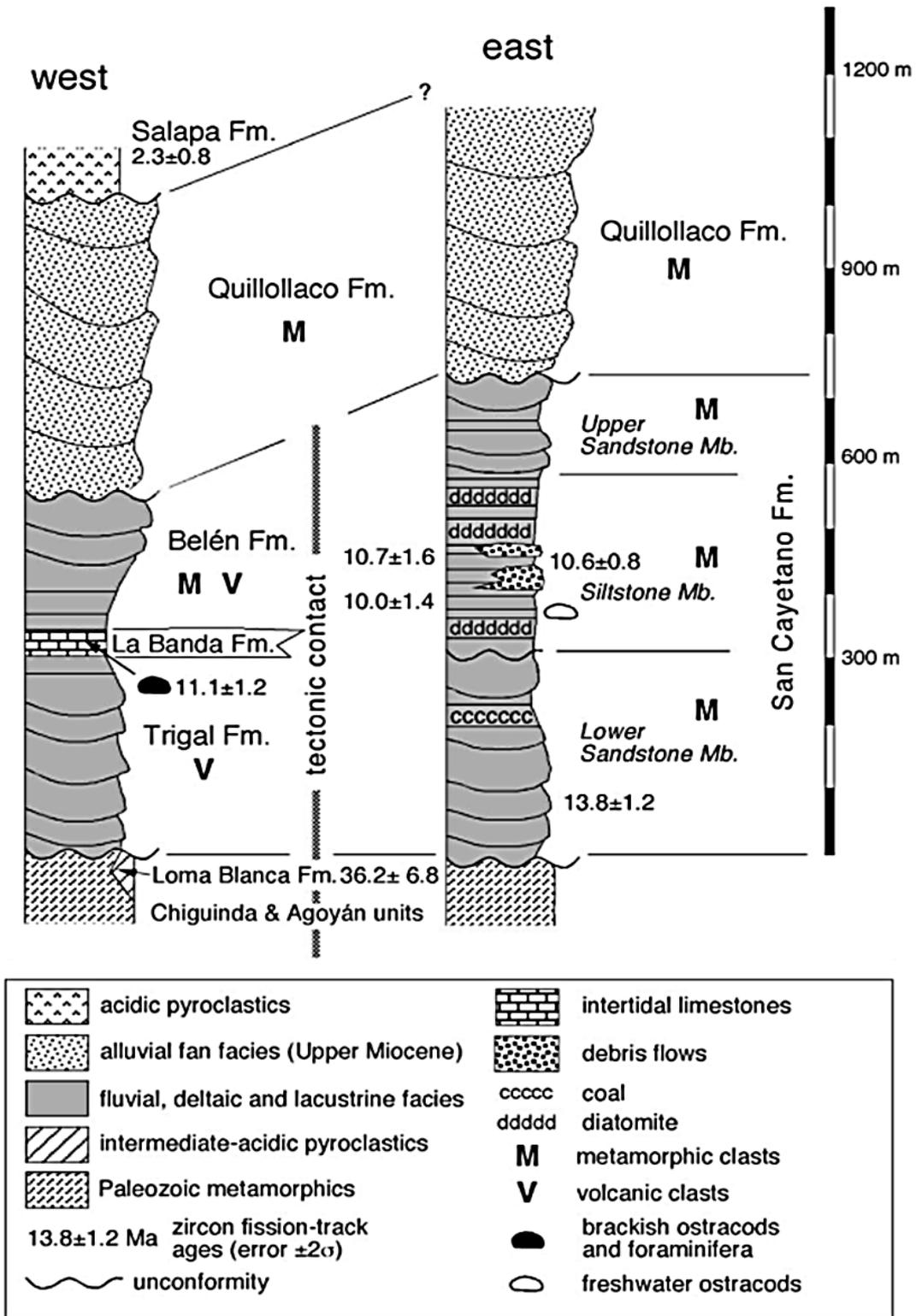


Figura 2. Columna Estratigráfica de la Cuenca de Loja.
Fuente: Hungerbuhler et al. (2002).

1.4 Hidrografía

El sistema hidrográfico de la cuenca de Loja es de tipo dendrítico, drenado principalmente por los ríos Zamora y Malacatos que fluyen hacia el Norte y descienden por el Este, a la cuenca Amazónica para desembocar en el Océano Atlántico (Soto, 2010). En el nudo de Cajanuma, límite meridional del valle de Loja, nace el sistema a través de dos ríos pequeños: Malacatos septentrional y Zamora Huayco. Estos ríos se unen al Norte de la ciudad de Loja, dando origen al río Zamora y engrosan su caudal recibiendo varios afluentes, siendo el principal el río Jipiro; quebrada Minas, quebrada Namanda.

El área de estudio se encuentra dentro de la Microcuenca Hidrográfica Santiago, y dentro de la misma se encuentran los afluentes de las quebradas Teneria, Carigan y Cumbe. (Figura 3).

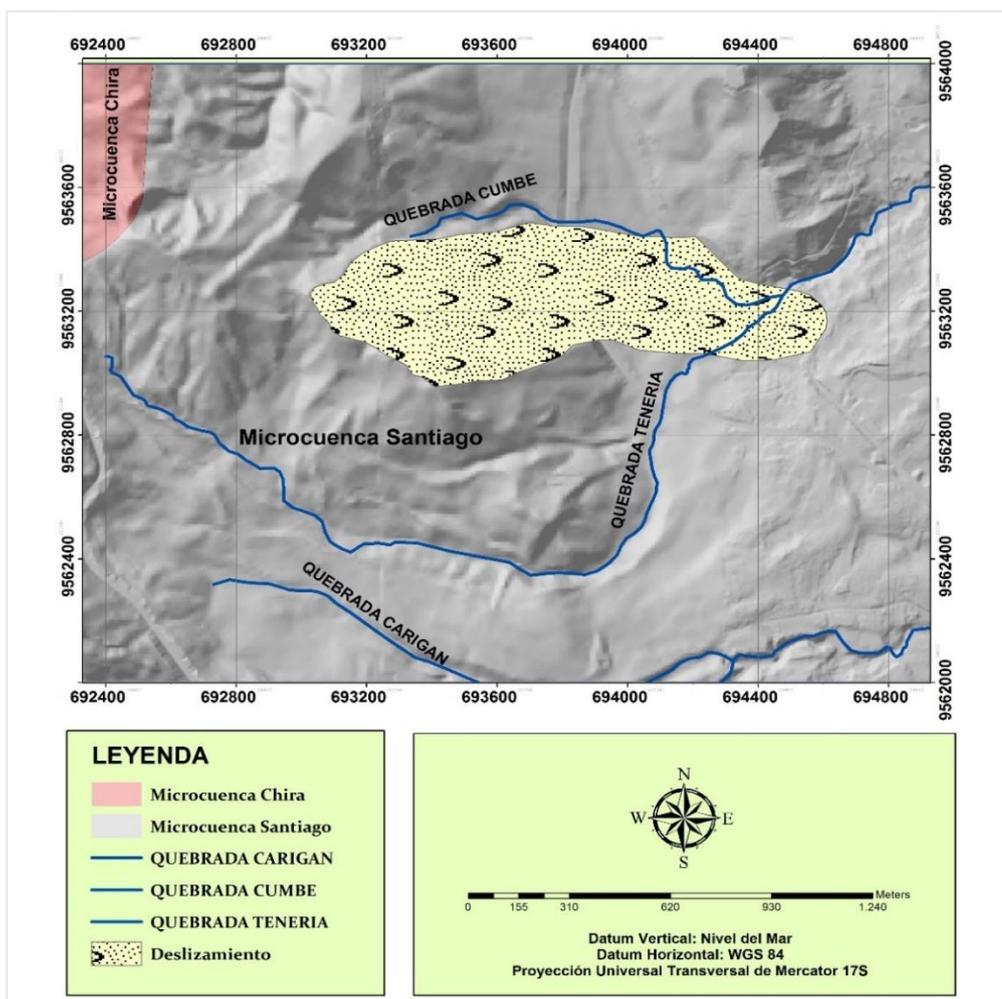


Figura 3. Mapa Hidrográfico de la Zona de Estudio.

Fuente: El Autor.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Mecánica de rocas

La mecánica de rocas engloba el estudio de las propiedades físico mecánicas de los materiales rocosos y de su respuesta a la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico (Gonzalez de Vallejo, et al. 2002). Esta guarda una estrecha afinidad con otras disciplinas, entre ellas, la mecánica de suelos para abordar en los estilos de rocas a profundidad y su meteorización en superficie; y la geología estructural encargada del estudio de los procesos y estructuras tectónicas que afectan a las rocas.

La complejidad de la caracterización de los macizos rocosos y el estudio de su comportamiento mecánico y deformacional se debe a la variación de las características y propiedades que presentan, elevando el número de factores que los condicionan.

Al referirnos al campo de la mecánica de rocas, debemos tener claro la diferencia entre macizo rocoso y matriz rocosa: el primero es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos; el segundo, es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de «roca intacta» que quedan entre ellas (Gonzalez de Vallejo, et al. 2002).

Las propiedades físicas controlan las características de resistencia y deformación de la matriz rocosa (composición mineralógica, porosidad, dureza, etc.), como resultado de la génesis y procesos geológicos y tectónicos soportados por las rocas durante toda su historia. En el comportamiento mecánico de los macizos rocosos intervienen también las características geológicas (litología, estratigrafía, discontinuidades tectónicas, etc.), hidrogeológicas, ambientales, climáticas, y fenómenos meteorológicos, los cuales actúan sobre el medio geológico modificando las propiedades iniciales de las rocas por acción de los procesos de meteorización y alteración. (Gonzalez de Vallejo, et al. 2002).

2.2 Caracterización de un Macizo Rcoso

El estado y comportamiento mecánico de los macizos rocosos son el resultado de la combinación de todos los factores descritos anteriormente, con diferente grado de importancia para cada situación. Por lo tanto, el estudio de la geología estructural y discontinuidades son aspectos elementales en la caracterización de un macizo rocoso para obras ingenieriles.

2.2.1. Macizos rocosos

De acuerdo con Gonzalez Vallejo et al. (2002), “Macizo Rocosos” es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de discontinuidades o planos de debilidad de diverso tipo que afectan al medio rocoso.

Los factores geológicos que dominan el comportamiento y las propiedades mecánicas de los macizos rocosos son:

- La litología y propiedades de la matriz rocosa.
- La estructura geológica y las discontinuidades.
- El estado de esfuerzos al cual está sometido el material.
- El grado de alteración o meteorización.
- Las condiciones hidrogeológicas.

Para el estudio de comportamiento del macizo rocoso debe analizarse las propiedades de la matriz rocosa y las discontinuidades.

2.2.2. Propiedades de la Matriz Rocosa

Las propiedades índices conjuntamente con la composición mineralógica y la fábrica determinan las propiedades y el comportamiento de la matriz rocosa. En la tabla 1, se observa una lista de todas estas propiedades con los respectivos métodos para su evaluación.

2.2.3. Discontinuidades

Una discontinuidad es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su caso, por la del material de relleno.

Los planos de discontinuidad de los macizos rocosos condicionan las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. Las discontinuidades brindan un carácter discontinuo y anisótropo a los macizos provocando que estos sean más deformables y débiles. Las discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura y permiten el flujo de agua.

Tabla 1. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.

	PROPIEDADES	MÉTODOS DE DETERMINACIÓN
Propiedades de identificación y clasificación	Composición Mineralógica.	Descripción visual.
	Fábrica y textura.	Microscopía óptica y electrónica.
	Tamaño de grano.	Difracción de rayos X.
	Color.	
	Porosidad (n).	Técnicas de laboratorio.
	Peso específico (γ).	
	Contenido de humedad.	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k).	Ensayo de permeabilidad.
Durabilidad.	Ensayo de alterabilidad.	
Alterabilidad (índice de alterabilidad).		
Propiedades mecánicas	Resistencia a la compresión.	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt.
	Resistencia a la tracción	Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
	Velocidad de ondas sísmicas	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.
	Resistencia (parámetros c y ϕ)	Ensayo de compresión triaxial.
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica, estáticos o dinámicos: E , ν).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sónica.

Fuente: Gonzalez Vallejo et al. (2002).

Las discontinuidades y los bloques de matriz constituyen en conjunto la estructura rocosa, y representan el comportamiento global del macizo rocoso, predominando uno u otro componente en función de sus propiedades relativas y de la escala o ámbito de estudio en el macizo. Gonzalez Vallejo et al. (2002).

2.2.3.1. Tipos de discontinuidades

Según Gonzalez de Vallejo et al. (2002), se han agrupado las discontinuidades en dos grupos, teniendo en cuenta el número de familias o planos de discontinuidad que atraviesan el macizo como se muestra en la Tabla 2.

- **Discontinuidades sistemáticas.** - cuando aparecen en familias y son definidas por la orientación estadística referida a una orientación media y por sus características generales.
- **Discontinuidades singulares.** - cuando aparece un único plano que cruza el macizo rocoso, suelen ser continuos y persistentes pudiendo llegar a dimensiones de varios kilómetros en el caso de las fallas. Requieren una descripción individualizada, puesto que pueden llegar a controlar el comportamiento mecánico del macizo por encima de la influencia de las discontinuidades sistemáticas.

Tabla 2. Tipos de discontinuidades.

Discontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de estratificación. - Planos de laminación. - Diaclasas o juntas. - Planos de esquistosidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallas. - Diques. - Discordancias.
Lineales	<ul style="list-style-type: none"> - Intersección de discontinuidades planares. - Lineaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ejes de pliegue.

Fuente: Gonzalez Vallejo et al. (2002).

2.2.4. Características de discontinuidades

En un macizo rocoso se describen las diferentes familias de discontinuidades e incluyen las siguientes características y parámetros geométricos: orientación, espaciado, continuidad o persistencia, rugosidad, abertura, relleno, filtraciones y resistencia de las paredes (Figura 4). Algunos de ellos, como la rugosidad, abertura, relleno y resistencia de las paredes, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia de los planos de discontinuidad.

- **Orientación.** - Definida por su dirección de buzamiento (0° a 360°) y buzamiento (0° a 90°). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro.
- **Espaciado.** – Condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa. Se define como la distancia entre dos planos de discontinuidades de una misma familia, medida en dirección perpendicular a dichos planos. Se mide con una cinta

métrica en una longitud suficientemente representativa. Se la coloca perpendicular a los planos.

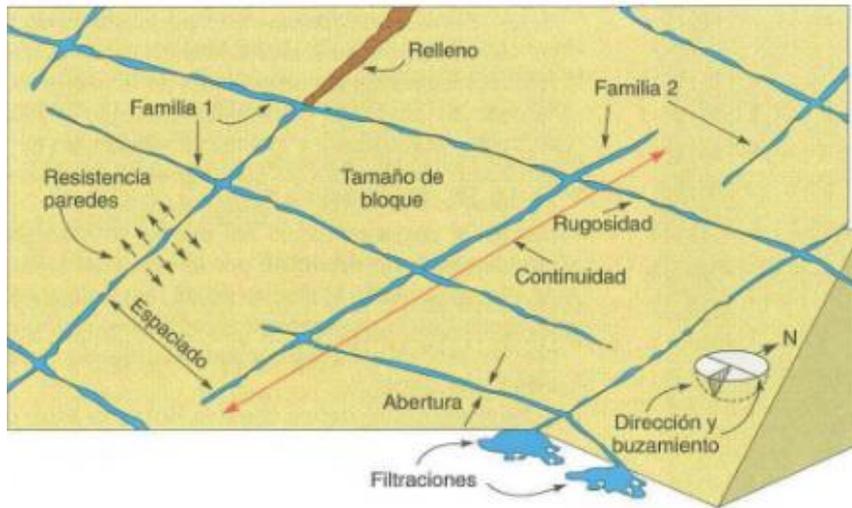


Figura 4. Representación esquemática de las propiedades de las discontinuidades (Hudson, 1989).

Fuente: Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

- **Continuidad.** – Extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Su medida se realiza con una cinta métrica.
- **Rugosidad.** – Se emplea este término para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidades, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala. Medida en campo a través de la comparación visual de la discontinuidad con perfiles estándar de rugosidad.
- **Abertura.** – Distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. La medida se la realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se emplea un calibre.
- **Relleno.** – Existe una gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas diferentes. Su presencia determina el comportamiento de la discontinuidad, por lo tanto, se debe describir su naturaleza, espesor, resistencia al corte y permeabilidad.

- **Filtraciones.** – Agua en el interior de un macizo rocoso que circula por las discontinuidades. En rocas permeables a través de la matriz rocosa.
- **Resistencia.** – La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. Depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno. Puede estimarse en campo con el martillo de Schmidt.



Figura 5. Ejemplos de las características de las discontinuidades: a) Orientación. b) Espaciado. c) Resistencia de las paredes de la discontinuidad.

Fuente: Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

2.2.5. Aspectos a considerar en la caracterización de un macizo

Según el Área de Geotecnia del Laboratorio de la Universidad de Córdoba (2010), son tres los aspectos a considerar para la caracterización de un macizo, las mismas se describen a continuación:

- **El tipo de roca que compone el macizo rocoso**

Analizar las rocas que constituyen un macizo rocoso de entre una gran variedad para determinar una composición simple o compleja, homogénea o compuesta, sea de granitos o rocas metamórficas que son rocas muy resistentes o de rocas sedimentarias que tiene una menor resistencia, todo esto en diferentes posibles escalas en la clasificación genética de las rocas.

- **La estructura de la masa rocosa**

La resistencia de un macizo rocoso puede depender fuertemente de la estructura primaria del macizo. Esta puede conferirle propiedades de isotropía, en el caso de ser una masa homogénea, o de anisotropía (positiva o negativa), y ambas deben tenerse en cuenta, tanto en la faz de construcción como en la de diseño y cálculo de las estructuras.

- **Estado de conservación de la roca**

La intemperización, actúa la mayoría de las veces en forma combinada con un debilitamiento estructural previo del macizo, el cual puede haber sido producido por el fallamiento, la fractura o el diaclasado. La actuación de los agentes físicos y químicos a través de los cuales se vehiculiza la alteración, puede resultar decisiva en cuanto a la resistencia mecánica o, mejor aún a las propiedades geotécnicas de un macizo rocoso.

2.3. Mecanismos principales de rotura de un talud.

Los diferentes tipos de roturas están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. En la Tabla 3, se presentan diferentes modelos de rotura en taludes para diferentes tipos de macizos rocosos. Los modelos de rotura más frecuentes son: rotura plana, en cuña, y por vuelco.

Tabla 3. Mecanismos de rotura en un talud.

MECANISMOS DE ROTURA		
ROTURA PLANA	<p>Plano de deslizamiento</p> <p>Discontinuidad</p> <p>ROTURA PLANA</p>	<p>Se produce a favor de una única familia de planos de rotura que buzcan en el mismo sentido que el talud y cuya dirección es paralela a la del frente del talud. Se producen fundamentalmente debido a que el buzamiento de los planos es menor que el del talud, llegando a diferencias de hasta 20°, con lo que el rozamiento movilizado no es suficiente para asegurar la estabilidad.</p>
ROTURA EN CUÑA	<p>Cuña de deslizamiento</p> <p>ROTURA EN CUÑA</p>	<p>Este tipo de rotura se da en la intersección de dos familias de planos de discontinuidad de diferente orientación, formándose una línea de inmersión a favor del talud, aunque con una inclinación inferior al buzamiento de este.</p>
ROTURA EN VUELCO	<p>Bloque inestable</p> <p>Fractura abierta</p> <p>ROTURA POR VUELCO</p>	<p>En este último caso el buzamiento de los planos de fracturación es contrario al propio del talud lo que provoca una división del macizo rocoso en bloques independientes que van cayendo por acción de la gravedad.</p>

Fuente: Nañon Blázquez, (2000).

2.4. Métodos de Clasificación Geomecánica de Macizos Rocosos

Para valorar la calidad del macizo rocoso, se emplean diferentes métodos de estudio, actualmente los métodos basados en las clasificaciones geomecánicas, son los que han tenido gran difusión. Los criterios utilizados están establecidos por parámetros cualitativos y cuantitativos, dando como resultado diferentes métodos de evaluación y valoración, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Métodos de Clasificación de macizos rocosos.

METODOS CUALITATIVOS	<ul style="list-style-type: none"> - Terzaghi (1946) - Lauffer (1958)
METODOS CUALI - CUANTITATIVOS	<ul style="list-style-type: none"> - Deere "RQD" (1964) - Barton, Liem y Lunde "Q" (1974) - Jacobs Assoc. "RSR" (1984) - Bieniawsky "RMR" (1984 - 1989)

Fuente: Gonzalez de Vallejo et al, (2002).

2.4.1. Índice de Calidad de las Roca o RQD.

Deere (1964), propuso un índice cuantitativo de la calidad de la roca basado en la recuperación de los fragmentos con perforación de diamante llamado índice de la calidad de la roca (Tabla 5). Estableció al **RQD** como el porcentaje representado por la sumatoria de longitudes de fragmentos de barrenos de diamante que se recuperan en longitudes enteras mayores o iguales a 100mm, dividida entre la longitud total perforada.

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos} \geq 100\text{mm}}{\text{Longitud total perforada}} \times 100 \quad (2.1)$$

Cuando no hay sondeos se utiliza la fórmula alternativa siguiente:

$$RQD (\%) = 115 - 3.3 J_v \quad \text{para } J_v > 4.5 \quad (2.2)$$

$$RQD (\%) = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4.5 \quad (2.3)$$

El valor de J_v determina contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias:

$$J_v = \sum \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} \quad (2.4)$$

Tabla 5: Índice de calidad de la roca.

RQD (%)	CALIDAD DE LA ROCA
<25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Excelente

Fuente: Deere (1964).

2.4.2. Rock Mass Rating o RMR.

Bieniaswsky (1989), define la calidad de un macizo rocoso valorando cuantitativa y cualitativamente una serie de parámetros:

1. Resistencia de la roca sana, determinada mediante ensayos de carga puntual y compresión uniaxial.
2. RQD, medido en sondeos o estimando.
3. Separación entre dos planos de discontinuidad juntas, fisuras o diaclasas consecutivas.
4. Estado de las diaclasas, atendiendo especialmente a su abertura, bordes y rugosidad de la superficie.
5. Existencia de flujo de agua intersticial a través de las juntas; el agua disminuye la resistencia mecánica de la roca.

Todos estos parámetros están tabulados, correspondiendo a cada rango de valores una puntuación o rating; la suma de todas las puntuaciones obtenidas en cada apartado determinará el índice **RMR**.

$$RMR = R_c + R_{RQD} + R_d + R_s + R_u \quad (2.5)$$

2.4.3. Slope Mass Rating o SMR.

El índice SMR, descrito por Romana en 1985, introduce una serie de modificaciones en función de las características del talud, de forma que es posible determinar el grado de calidad y fiabilidad que ofrece un talud rocoso.

Su valor se calcula partiendo del índice RMR, al que se le resta un factor de ajuste – función de la orientación de las juntas y se le suma otro coeficiente en función del método de excavación aplicado:

$$\text{SMR} = \text{RMR} - (\mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \times \mathbf{F}_3) + \mathbf{F}_4 \quad (2.6)$$

Dónde:

$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2$ Depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de la cara del talud.

$F_2 = tg^2 \beta_j$ Depende del buzamiento de las juntas (β_j) en la rotura plana, midiendo de alguna forma la probabilidad de la resistencia al esfuerzo cortante de dichas juntas.

$F_3 = \beta_j - \beta_s$ (Rotura plana)

$F_3 = \beta_j + \beta_s$ (Rotura con vuelco) Refleja la relación existente entre los buzamientos de los planos de discontinuidad (β_j) y de talud (β_s).

F_4 Hace referencia a la influencia del método de excavación utilizado en la estabilidad del talud. Aquellos métodos que originen un mayor residuo o fisuren las capas superficiales del talud favorecerán el desprendimiento de fragmentos y bloques rocosos, precipitándose ladera abajo hacia la zona de explanación.

2.4.4. Índice Q de Barton.

Según Barton, Lien, & Lunde, (1974), clasifican a los macizos rocosos según el denominado índice de calidad Q, basado en los siguientes seis parámetros, los mismos que se utilizan en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SFR} \quad (2.7)$$

RQD= Índice de calidad de la Roca.

Jn= Número de sistemas de fisuras.

Jr= Rugosidad de las fisuras.

Ja= Alteración de las fisuras.

Jw= Factor de reducción por agua en las fisuras.

SRF= Factor de reducción por esfuerzos.

2.4.5. Geological Strength Index o GSI.

Según Gonzalez Vallejo et al. (2002), la caracterización del macizo rocoso se basa en las descripciones de la calidad del macizo a partir de observaciones geológicas en el campo. Observaciones geológicas de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas.

El valor del Índice GSI (Figura 11) se estima por la siguiente ecuación:

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad (2.8)$$

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suavemente moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Figura 6. Estimación del GSI basado en descripciones geológicas (Hoek y Brown, 1997).

Fuente: Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

2.5. Estabilidad de taludes

Es la seguridad que presenta una masa de tierra frente a un movimiento o falla. Es común precisar la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe detallar la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc.

2.6. Resistencia al Corte de Discontinuidades

La resistencia de los planos de discontinuidad viene dada por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, y se determina a través del ensayo de resistencia al corte en laboratorio y puede también estimarse con el ensayo de corte directo in-situ. La resistencia al corte de las discontinuidades depende fundamentalmente de la fricción de los planos y, en menor cuantía, de la cohesión. La rugosidad o irregularidad de las paredes de la discontinuidad es uno de los factores que más influye en la resistencia friccional, sobre todo en discontinuidades sometidas a bajos esfuerzos normales.

La resistencia al corte de discontinuidades sin cohesión se estimó a partir de datos obtenidos en campo mediante el criterio de (Barton & Choubey , 1977).

$$\tau_p = \sigma'_n \tan (JRC \log_{10} (JCS / \sigma'_n) + \phi_\tau) \quad (3.1)$$

Donde:

τ_p = Resistencia al corte de pico en discontinuidades rugosas sin cohesión.

σ'_n = Esfuerzo normal efectivo sobre el plano de discontinuidad

JRC = Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad. Perfiles de rugosidad.

JCS = Resistencia a la compresión simple de la pared de la discontinuidad.

ϕ_τ = Ángulo de rozamiento residual de la discontinuidad, se estima a partir de:

$$\phi_\tau = (\phi_\varphi - 20^\circ) + 20^\circ (r R /) \quad (3.2)$$

Siendo:

r = el valor del rebote del martillo Schmidt sobre la pared de la discontinuidad.

R = Valor del rebote del martillo Schmidt sobre la matriz rocosa.

ϕ = Ángulo de fricción básico del material. Se lo calcula en función de la carga litostática sobre la discontinuidad.

2.7. Programa DIPS 6.0.

DIPS es un software diseñado para visualizar y analizar información estructural de manera similar como si usáramos una red estereográfica (Figura 7). El programa es un conjunto de herramientas capaces de diferenciar aplicaciones especialmente entre aquellas necesarias para el análisis de datos geológicos de orientación.

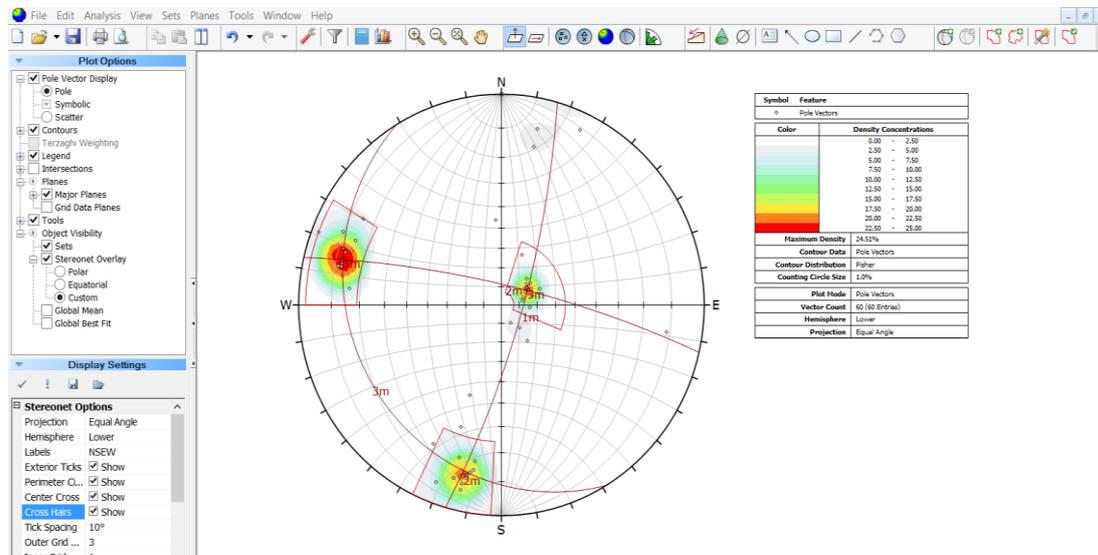


Figura 7. Interfaz del software DIPS 6.0.

Fuente: DIPS (2016).

2.8. Análisis Estereográfico.

El análisis estereográfico se lo realiza mediante la representación de disposiciones estructurales en el espacio interior de una esfera de diámetro cualquiera y debidamente orientada, para resumir toda la información geológica en un plano diametral horizontal (Babín Vich & Gómez Ortiz, 2010).

Según Sus campos de aplicación son:

- Definición de las estructuras geológicas predominantes
- Determinación de la dirección de los esfuerzos principales.
- Identificación de mecanismos de falla probables y análisis cinemático de bloques inestables.
- Cálculo de parámetros de corrección del método RMR de clasificación de macizos rocosos para su aplicación a taludes.

2.9. Caracterización de Movimientos de Ladera.

Los movimientos en laderas naturales pueden ser profundos y movilizar millones de metros cúbicos de material; los mecanismos de rotura, además, suelen ser complejos, estando condicionados por factores o procesos a escala geológica (fallas, procesos tectónicos, procesos geomorfológicos, litorales, flujos de agua subterránea, etc.).

Las inestabilidades en las laderas, al igual que en los taludes excavados, se deben al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes. Este desequilibrio puede ser debido a una modificación de las fuerzas existentes o a la aplicación de nuevas fuerzas externas estáticas o dinámicas.

2.9.1. Movimientos de ladera.

Son movimientos de masa de suelo o roca que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes (hasta varios millones de metros cúbicos).

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas.

2.9.2. Causas de los movimientos de ladera.

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno.

Los factores **condicionantes o pasivos** dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los **desencadenantes o activos** pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos.

- Dentro de los **factores condicionantes**, las propiedades físicas y resistentes de los materiales (directamente relacionadas con la litología), además de las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales

para la predisposición a la inestabilidad. Otros factores importantes son la estructura geológica y discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y los estados tenso-deformacionales. Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

- Con respecto a los **factores desencadenantes** los más importantes son las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos; algunos de ellos, como los cambios de las condiciones de agua y de geometría, frecuentemente son consecuencia de acciones antrópicas. Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

2.10. Reconocimientos Generales.

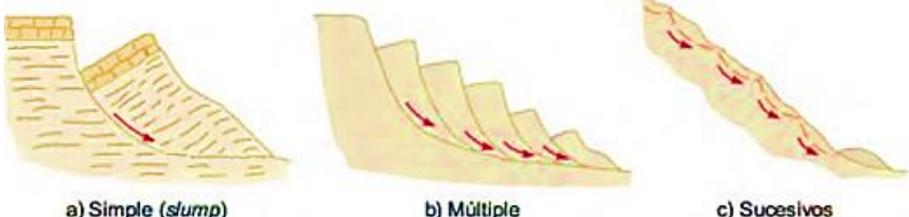
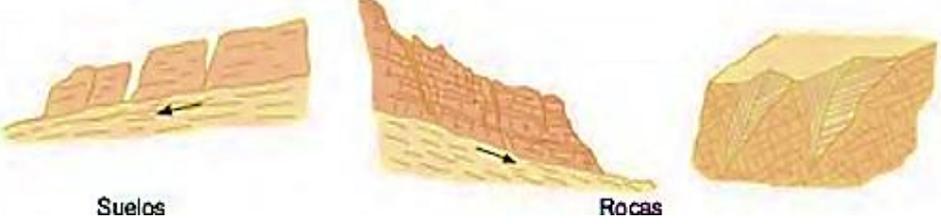
Según Gonzalez de Vallejo et al. (2002), los métodos y técnicas para identificar movimientos de laderas activos o antiguos y para el reconocimiento de zonas inestables consisten, básicamente, en la identificación de rasgos propios de estos procesos, evidencias de movimientos y otros signos asociados a su aparición son:

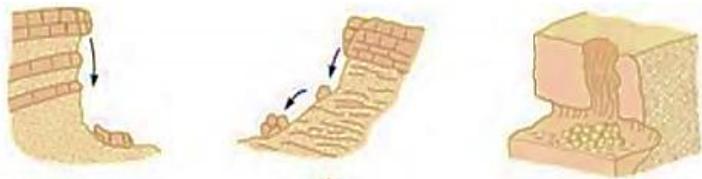
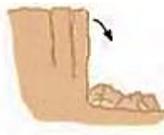
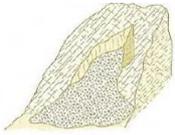
- Formas erosivas y de acumulación (anomalías en la pendiente de las laderas).
- Depósitos deslizados.
- Grietas y escarpes.
- Daños en construcciones o estructuras, conducciones, obras lineales, etc.
- Tipos y características de la vegetación.
- Modelos de drenaje, zonas encharcadas, sugerencias.
- Desvío de cauces, depósitos de masas deslizadas en llanuras de inundación.

2.11. Tipos de deslizamientos.

Existen diferentes parámetros que se utilizan para clasificar un deslizamiento como la geometría, material, geomorfología y velocidad de movimiento. La Tabla 6, nos muestra la clasificación de deslizamientos basados en la geometría del deslizamiento.

Tabla 6. Clasificación de los deslizamientos.

Deslizamiento Rotacional	 <p style="text-align: center;">a) Simple (<i>slump</i>) b) Múltiple c) Sucesivos</p> <p>Son más frecuentes en suelos cohesivos homogéneos. La rotura, superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a escalones con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas.</p>	
Deslizamiento Traslacional	 <p style="text-align: center;">Suelos Rocas</p> <p>La rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes (superficie de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural, etc.); en ocasiones, el plano de rotura es una fina capa de material arcilloso entre estratos de mayor competencia. No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzar grandes distancias.</p>	
Flujos		<p>La colada de barro o tierra (mudflow o earthflow) se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundo; la pérdida de resistencia suele estar motivada por la saturación en agua.</p>
	<p>Los flujos de derrubios son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla. Tienen lugar en laderas cubiertas por material suelto o no consolidado, como es el caso de los depósitos de morrenas glaciares, y especialmente en aquellas donde no existe cobertera vegetal.</p>	
	<p>Golpes de arena y limo: Movilizaciones bruscas por colapso estructural del suelo, debido a sacudidas sísmicas o a rotura del suelo por desecación, principalmente en suelos tipo loess y en arenas secas</p>	

		<p>Reptación: Movimiento superficial (unos decímetros) muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados, provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, etc. en las laderas.</p>
		<p>La solifluxión afecta igualmente a la zona más superficial de las laderas, y es un movimiento producido por los procesos hielo-deshielo que, por los cambios de temperatura diarios o estacionales, afecta al agua contenida en los suelos finos en regiones frías.</p>
Desprendimientos	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Los desprendimientos son caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes. Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, siendo frecuentes las roturas en forma de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Rocas</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Suelos</p> </div> </div> <p>Los vuelcos de estratos o de fragmentos de masas rocosas se producen cuando los estratos buzan en sentido contrario a la ladera, por estar fracturados en bloques o por rotura de la zona de pie de la ladera.</p>	
Avalanchas	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Rocas</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Derrubios</p> </div> </div> <p>Considerados como desprendimientos o movimientos complejos son muy rápidos, con caída de masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas y pueden ir acompañadas de hielo y nieve</p>	

Desplazamiento Lateral	
	Hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas.

Fuente: Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

2.12. Parámetros para la Caracterización de los Movimientos de Ladera.

Adicionalmente al tipo de movimiento, es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, tamaño, velocidad, humedad, y material. Estas características se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Glosario para la caracterización de movimiento en masa.

TIPO	SECUENCIA	ESTADO DE ACTIVIDAD	TAMAÑO	VELOCIDAD	HUMEDAD	MATERIAL
Caído	Progresivo	Activado	Extremadamente pequeño	Extremadamente rápido	Seco	Roca
Inclinación	Retro-progresivo	Reactivado	Muy pequeño	Muy rápido	Húmedo	Tierra
Rotación	Ampliándose	Suspendido	Pequeño	Rápido moderado	Mojado	Residuos
Translación	Alargándose	Inactivo	Mediano	Lento	Muy Mojado	Lodo
Extensión Lateral	Confinado	Dormido	Medianamente grande	Muy Lento		
Hundimiento	Disminuyendo	Abandonado	Muy grande	Extremadamente Lento		
Flujo		Estabilizado	Extremadamente grande			
Avalancha		Relicto				
Lahar						

Fuente: Suarez Díaz (2009).

CAPÍTULO III
METODOLOGIA

Actualmente llevar a cabo el análisis de un macizo rocoso engloba ciertas consideraciones en las que no se busca solamente el aprovechamiento económico, sino también el realizar un estudio que se pueda aplicar en beneficio de la comunidad. El desarrollo de este análisis permite obtener información necesaria para evaluar el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos y así planificar investigaciones y a la vez interpretaciones más avanzadas. Los criterios utilizados en la investigación están basados en parámetros cuantitativos y cualitativos.

3.1. Levantamiento Geológico

El levantamiento de datos geológicos – estructurales es el primer paso en el estudio de la caracterización de taludes, pues es necesario conocer el comportamiento geológico de la superficie del suelo y proyectar las condiciones del subsuelo, así como su litología y la disposición de los materiales.

Este proceso comprende etapas como la identificación de unidades litológicas y su respectiva descripción, análisis estructural en el que se toman datos estructurales (Azimut de Buzamiento - Buzamiento), zonificación lito-estructural para la identificación de zonas y/o estaciones geomecánicas y finalmente la identificación de condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas.

Todas las observaciones y medidas identificadas en campo fueron registradas en la ficha elaborada previamente con todos los campos necesarios para la caracterización de los taludes (Anexo H). Además se complementó esta información con la toma de fotografías.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron materiales como: fichas de campo, martillo de geólogo, brújula Brunton, cinta métrica, regla medida en milímetros, cámara fotográfica, esclerómetro o martillo de Schmidt y GPS.

3.2. Obtención de datos geomecánicos

Para establecer una estación geomecánica se inició con la observación de las características geomecánicas del talud como la orientación de diaclasas, litología, rugosidad, humedad, etc., con el objetivo de valorar la calidad del macizo rocoso. De manera general se observaron las discontinuidades y la matriz rocosa en un entorno de 5 - 10 m del punto a investigar. Se observaron estaciones o zonas geomecánicas cuyas características se diferenciaban notablemente unas de otras.

Una estación geo-mecánica requiere de un estudio completo, midiendo buzamientos, rumbos y una serie de requisitos establecidos en la plantilla de trabajo (Anexo H), la misma que contiene parámetros basados en tablas estandarizadas que permitan realizar de forma correcta el análisis. Para el trabajo de investigación se utilizó una plantilla en base a las tablas recopiladas por Gonzalez de Vallejo et al. (2002).

3.3. Proyección estereográfica

En las interpretaciones de los datos geológicos estructurales es necesario el uso de proyecciones estereográficas que permitan la representación en dos dimensiones, de datos en tres dimensiones. En el análisis, la característica más importante de las discontinuidades es su orientación. Se empleó el software DIPS 6.0 para el análisis de estos.¹

Su interface permite que el usuario pueda agregar polos con sus respectivas identificaciones, modificar los colores de los polos y el fondo de la página principal. Además, DIPS 6.0 permite realizar un análisis cinemático directamente en su plataforma ingresando valores de buzamiento, azimut de buzamiento, ángulo de fricción y límite lateral. Es necesario que el análisis sea realizado a partir de una muestra grande de datos con la finalidad de obtener el plano representativo de la orientación de cada familia de discontinuidades, generando así modelos precisos que nos permitan determinar el tipo de rotura del talud.

3.4. Análisis cinemático de taludes en roca.

Es necesario comprender como se presentan los diferentes tipos de rotura en roca en el programa DIPS, para identificar estos modelos y realizar un análisis cinemático correcto.

¹ DIPS es un programa de manejo simple en el cual se ingresan los datos de buzamiento y azimut de buzamiento para poder visualizarlos ya sea en diagramas de frecuencia de polos o en diagrama de contornos y así realizar su interpretación.

3.4.1. Modelos típicos de rotura

La estabilidad de un talud está condicionada por la orientación de las discontinuidades, que podría resultar en inestabilidad y rotura debido a una orientación desfavorable del talud con respecto a la de las diaclasas.

Por lo tanto, se realizó el análisis estereográfico de los datos estructurales denominado análisis cinemático determinando el tipo de rotura predominante en base a las siguientes características:

- Se determina una rotura plana (Figura 8), si al incorporar en la proyección estereográfica la orientación del talud y discontinuidades existe una familia con una dirección similar a la del talud y con buzamiento menor que el mismo. Por lo tanto, la dirección del movimiento después de la rotura será en sentido perpendicular a la dirección del talud y con el mismo sentido de buzamiento.
- Si en la proyección estereográfica se observa que existen dos familias de discontinuidades con direcciones oblicuas en comparación a la dirección del talud se puede estimar que se trata de una rotura en cuña (Figura 8), la misma que estará comprendida entre las dos familias. La dirección del movimiento será en la intersección de ambos planos de discontinuidad obtenida directamente de la representación estereográfica.
- Se obtiene una rotura con vuelco, en una proyección estereográfica si se observa la existencia de dos familias con direcciones subparalelas a la del talud, una con buzamiento muy suave y en el mismo sentido que el talud; y la otra familia con un buzamiento opuesto al del talud y ligeramente perpendicular al juego anterior (Figura 8). Por lo tanto, la primera familia delimitará los bloques y a su vez indicará la superficie sobre la cual girarán los bloques en función de su buzamiento.

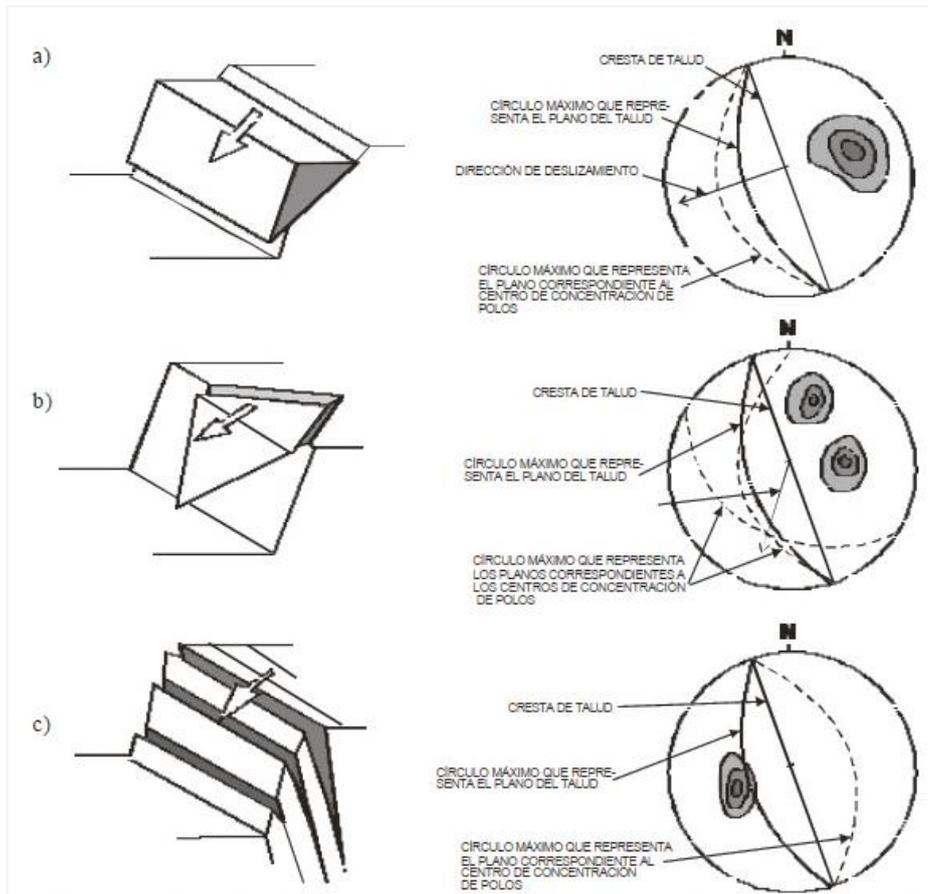


Figura 8. Tipos de roturas en macizos rocosos y su representación estereográfica.

Fuente: Lain Huerta, (2004).

3.5. Clasificaciones Geo-Mecánicas

A continuación se detalla la metodología empleada en cada una de las clasificaciones para posteriormente realizar una comparación de resultados y dar mayor veracidad a los resultados.

3.5.1. Clasificación RQD (1964).

El índice de calidad de la roca (RQD) se estimó mediante el parámetro J_v , que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1m^3) del macizo rocoso. El valor de J_v se o determinó contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias:

$$J_v = \sum \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} \quad (2.4)$$

3.5.2. Clasificación RMR (1989).

Bieniawski en 1989, modifica su clasificación la cual se basa en cinco parámetros geomecánicos que dividen al macizo rocoso en zonas de estructura geológica similar. Los valores de esta clasificación están dados en base al Anexo A.

3.5.2.1. Resistencia a la compresión simple (Martillo de Schmidt)

Para la ejecución del ensayo con el martillo de Schmidt se inició limpiando la zona a medir, a continuación se posicionó el martillo de forma perpendicular a la superficie de tal forma que al empujar el punzón este salte obteniendo la lectura marcada en la barra numérica del martillo. Se recomienda realizar entre 10 a 20 medidas diferentes por zona.



Fotografía 1. Medición de la Resistencia de las rocas con el Martillo de Schmidt.

Fuente: El autor.

Con los datos obtenidos de las lecturas, de cada 10 valores se eliminan los cinco menores y se obtiene el valor medio de los datos restantes. Para determinar la resistencia a compresión simple se usa el grafico del **Anexo G**, donde en función de la inclinación del martillo, se coloca el valor del rebote medio desde el eje de abscisas hasta alcanzar el valor de la densidad de la roca expresada en KN/m^3 . A partir de este punto se traza una línea horizontal hasta cortar el eje de ordenadas, obteniendo así la resistencia de compresión simple expresada en Mpa.

3.5.2.2. Índice de calidad de la roca, "RQD" (1964).

Determinamos el valor de J_v contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias, utilizamos la ecuación 2.4.

La longitud de medida depende del espaciado de cada familia, variando normalmente entre 5 y 10 metros. El valor de RQD se determinó por la expresión:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (2.2)$$

Para la clasificación geomecánica RMR de Bieniaswki el parámetro RQD se puede obtener una valoración mínima de 3 puntos (25%) y una máxima de 20 puntos (90-100%).

3.5.2.3. Espaciado de las discontinuidades.

La determinación de este parámetro se lo realizó a partir de mediciones en el campo con la ayuda de un flexómetro. Su valoración en la clasificación SMR se puede obtener de 5 a 20 puntos.

3.5.2.4. Estado de las juntas.

Este parámetro se lo obtuvo a partir de mediciones y observaciones en el campo las mismas que son registradas en la hoja de trabajo (Anexo H). Se subdivide en 5 parámetros: continuidad, abertura, rugosidad, relleno y alteración cuya valoración máxima por cada parámetro es de 6 puntos y 0 puntos como valoración mínima.

3.5.2.5. Presencia de agua

Se lo realizó a partir de observaciones en campo la cual puede obtener una valoración de 0 a 15 puntos.

Una vez obtenida las valoraciones correspondientes para cada parámetro se procedió a sumar obteniendo así una puntuación total con la cual se establece la clase y calidad del macizo rocoso acuerdo a la tabla presente al final del **Anexo A**.

3.5.3. Clasificación SMR (1985).

El índice SMR se obtuvo restando del RMR básico los factores de ajuste (F1, F2 y F3) mas F_4 , como se indica en la **ecuación 2.6**. Las valoraciones de cada factor de ajuste

se determinan a partir de las ecuaciones descritas en el **Anexo B** según el tipo de rotura. Finalmente con el valor resultante de la ecuación se define sus respectivas calidades y tipo de inestabilidad en base a la tabla del **Anexo C**.

3.5.4. Índice “Q” de Barton (1974).

La determinación del Índice “Q” fue en base al **Anexo D** y a la ecuación **2.7**. El resultado de esta ecuación se lo analizó con la tabla del **Anexo E**.

3.6. Caracterización del deslizamiento

Dentro del área de estudio se encuentran los dos taludes afectados por el movimiento en masa. Por ello, después de realizar un estudio in situ se analizó de manera individual y conjuntamente la caracterización del deslizamiento que ha afectado de manera significativa el talud ubicado en la base de la vía principal.

Se realizó un reconocimiento del polígono delimitando el área afectada para lo cual se examinó varios aspectos entre ellas: las dimensiones del movimiento tanto su longitud como su ancho, propiedades del material, escarpes principales y secundarios, grietas, agua, cambios en la vegetación. También se tomó en cuenta los daños visibles en las vías, casas, drenajes, zanjas, inclinación de árboles y cercas. Con todos los factores analizados en conjunto se determinó el tipo de movimiento y su dirección W-E. Es importante realizar apuntes de todas las observaciones realizadas en campo que nos permitan definir los factores condicionantes y determinantes del movimiento de ladera.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Geología local de la zona de estudio

Se analizaron dos macizos rocosos con propiedades geomecánicas diferentes los cuales se han visto afectados por un deslizamiento el cual litológicamente está conformado por rocas metamórficas correspondientes a la Unidad Chigüinda, conglomerados de la formación Trigal y coluviales.

Las unidades litológicas que lo constituyen son:

- **Unidad Metamórfica**

El área de estudio está conformado en su mayor parte (77%) por rocas metamórficas pertenecientes a la Unidad Chigüinda. Litológicamente esta unidad está constituida principalmente por: esquistos micáceos con un alto grado de meteorización (Fotografía 2), esquistos de grano muy fino que tienen un brillo satinado que puede ser por la presencia de micas, y esquistos grafitosos denominados así por la presencia de materia orgánica como el grafito que proporciona al esquisto un color grisáceo oscuro (Fotografía 3). Dentro de esta unidad se encuentran ubicados los dos macizos analizados en el presente proyecto, siendo sus coordenadas de referencia: X= **693967**, Y= **9563052** para el primer macizo; X= **693308**, Y=**9563039** para el segundo macizo.



Fotografía 2. Esquistos - Formación Chigüinda.

Fuente: El Autor.



Fotografía 3. a) Micropliegue de tipo b) Esquistos de grano fino de la Formación Chiguinda.

Fuente: El Autor.

- **Unidad de Conglomerados**

De tipo *conglomerado poligénico*, contiene una gran variedad de distintos materiales de rocas metamórficas con una matriz sedimentaria arcillo - arenosa, así como partículas individuales. Los clastos tienen un tamaño de rango de 1 a 3 cm llegando a clastos en bajas proporciones de 12 cm. Los clastos son redondeados y se encuentran altamente meteorizados. Siendo los de mayor tamaño los que se sitúan en la parte superior, y los de menor tamaño en la parte inferior. Esta litología pertenece a la formación Trigal



Fotografía 4. Conglomerados de la Formación Trigal.

Fuente: El Autor.

- **Depósitos Coluviales**

Depositados paralelamente a la vía principal, estos materiales han sido transportados por gravedad a causa de la pendiente de la ladera. Su composición se basa en fragmentos de rocas metamórficas tipo esquistos, filitas y minerales

tipo cuarzo, envueltos en un matriz limo arcilloso. A menudo se encuentran asociados a masas inestables por ello la resistencia de estos materiales es muy baja.



Fotografía 5. Depósitos coluviales.

Fuente: El Autor

Con el análisis de los diferentes afloramientos presentes en la zona de estudio se genera un Mapa Geológico (Figura 9) con las diferentes formaciones geológicas de la zona de estudio. En este mapa se marca los dos puntos de ubicación de los dos taludes conjuntamente con el polígono del movimiento de ladera.

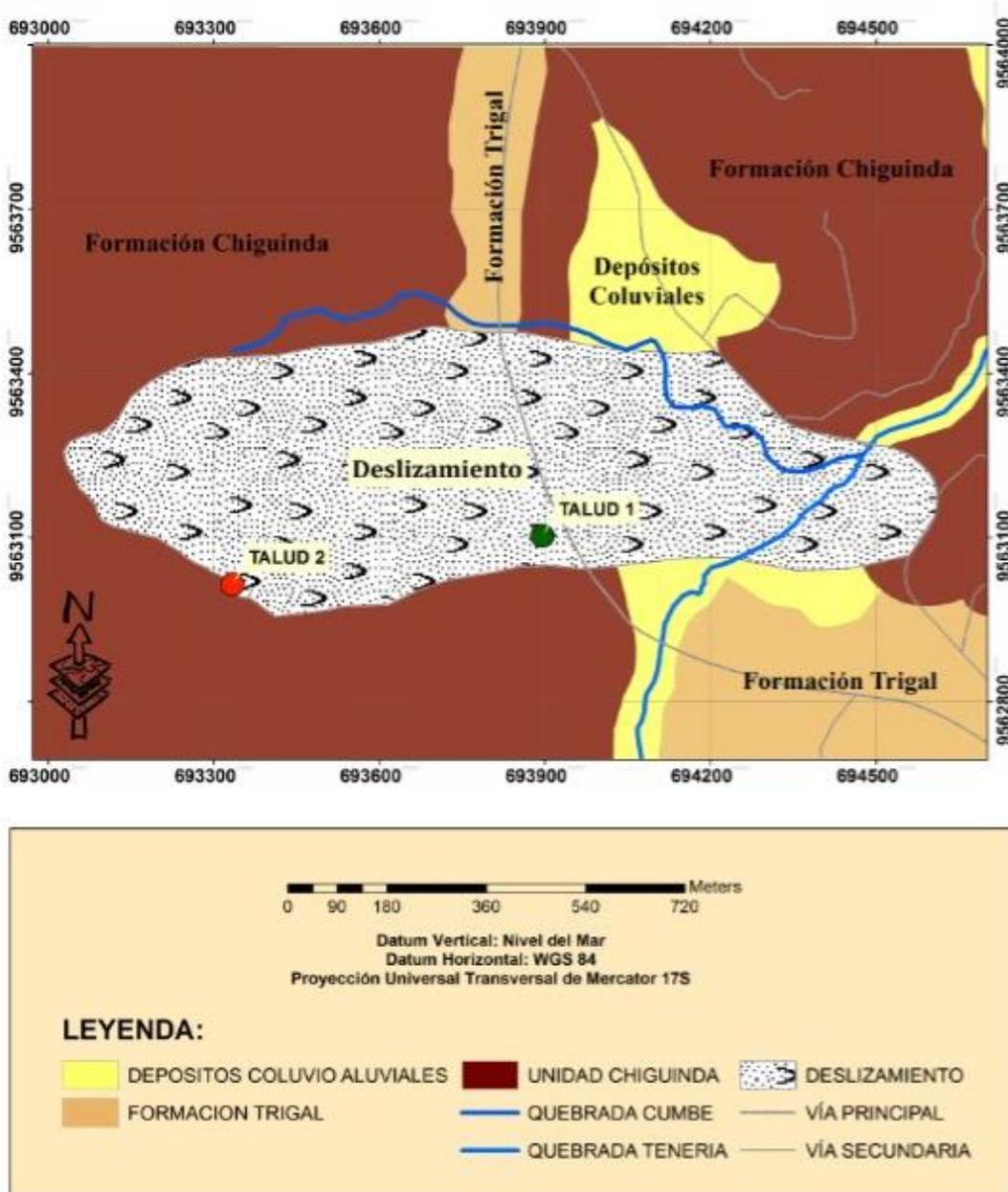
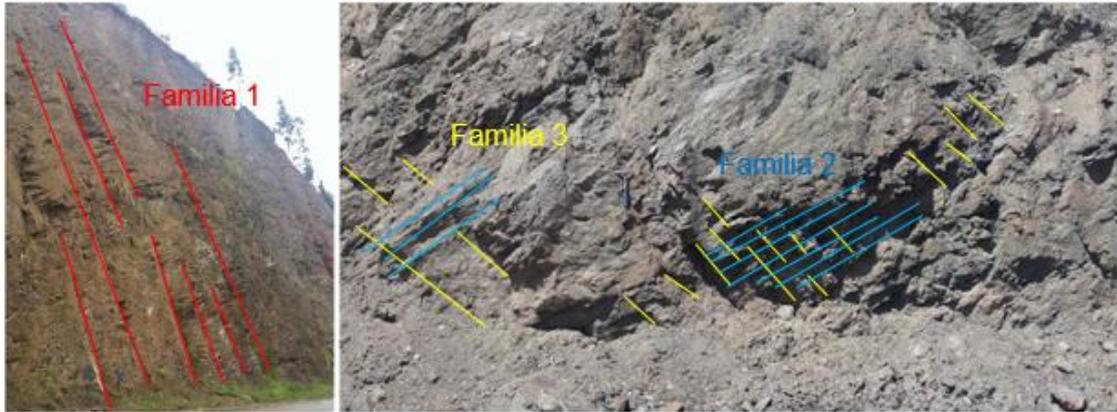


Figura 9. Mapa geológico del área de estudio.

Fuente: El Autor.

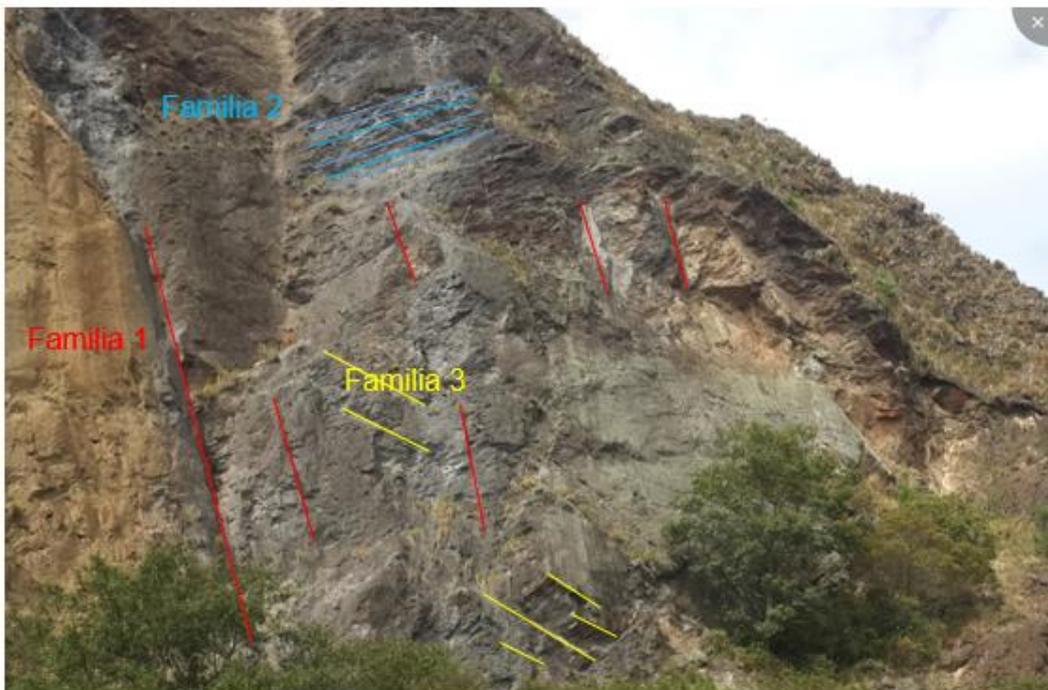
4.2. Análisis del macizo rocoso.

Para la determinación de las familias de diaclasas o discontinuidades que afectan a un macizo rocoso suelen elaborarse diagramas de los planos de discontinuidad. A continuación se representan las familias de diaclasas principales obtenidas en la caracterización de ambos taludes (Fotografía 6 y 7).



Fotografía 6. Familias de diaclasas del Talud 1.

Fuente: El Autor.



Fotografía 7. Familias de diaclasas del Talud 2.

Fuente: El Autor.

4.2.1. Características de las discontinuidades

En los dos Taludes se observaron tres sistemas de diaclasas (familia 1, 2 y 3) distribuidas por todo el macizo, estos sistemas se encuentran altamente afectados por la presencia de agua. Las mediciones se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Familias de discontinuidades de los macizos rocosos.

Talud	SISTEMAS DE DIACLASAS	Dirección de Buzamiento (DIP DIRECTION)	Ángulo de buzamiento (DIP)	Espaciado de discontinuidades (cm)
1	Familia 1	31°	N 70° E	217
	Familia 2	140°	S 28° E	23
	Familia 3	339°	N 52° W	12
2	Familia 1	351°	N 60° W	22
	Familia 2	136°	S 38° E	27
	Familia 3	33°	N 71° E	42

Fuente: El Autor.

4.2.1.1. Rugosidad.

Se ha medido en campo colocando una regla sobre las rugosidades para luego realizar una comparación visual con los perfiles de rugosidad modificados de González Vallejo, 2002. En la Tabla 9 se ha clasificado la rugosidad para las distintas familias encontradas en los Taludes 1 y 2.

Tabla 9. Rugosidad en las discontinuidades de los taludes 1 y 2.

No. Familia	TALUD 1	TALUD 2
1	Escalonada Rugosa	Escalonada Rugosa
2	Escalonada Pulida	Escalonada Pulida
3	Escalonada Lisa	Plana Rugosa

Fuente: El Autor.

4.2.1.2. Continuidad.

La continuidad definida como la extensión del plano de discontinuidad. Define si la matriz rocosa se encuentra involucrada en los procesos de rotura del macizo rocoso. La medición de las continuidades en campo para los Taludes 1 y 2 se la realizó con cinta métrica. Los valores obtenidos se encuentran en un rango de continuidad detallado en la Tabla 10.

Tabla 10. Continuidad de las diaclasas medidas en un rango de continuidad.

Talud	Sistemas de Discontinuidades	Continuidad	Rango de Continuidad (m)
1	Familia 1	Continuidad Media	3 – 10
	Familia 2	Baja Continuidad	1 – 3
	Familia 3	Muy Baja Continuidad	< 1
2	Familia 1	Baja Continuidad	1 – 3
	Familia 2	Baja Continuidad	1 – 3
	Familia 3	Continuidad Media	3 – 10

Fuente: El Autor.

4.2.1.3. Abertura.

TALUD 1: Se realizaron las medidas de abertura en campo con la ayuda del calibrador pie de rey para los Taludes 1 y 2, estas medidas se muestran en la Tabla 11.



Foto 8. Medición de aberturas.

Fuente: El Autor.

Tabla 11. Abertura de los sistemas de diaclasas para los taludes 1 y 2.

Talud	Sistemas de Discontinuidades	Abertura	Tamaño de Abertura (mm)
1	Familia 1	Moderadamente Abierta	> 5
	Familia 2	Muy Cerrada	<1
	Familia 3	Moderadamente Abierta	> 5
2	Familia 1	Abierta	1 – 5
	Familia 2	Muy Cerrada	< 0.1
	Familia 3	Cerrada	0.1 – 1.0

Fuente: El Autor.

4.2.1.4. Espaciado.

El espaciado influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques de matriz rocosa que forman las diferentes familias. El espaciado medido entre cada familia se muestra en la tabla 8 conjuntamente con el buzamiento y dirección de buzamiento.

4.2.1.5. Relleno.

Debido a la fricción que existe entre diaclasas y por el arrastre de materiales finos por agua que a su vez se filtra por las mismas se forma el relleno en las paredes de las discontinuidades. El agua rebaja la resistencia al corte al disminuir las tensiones efectivas actuantes sobre los planos de discontinuidad. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno como la resistencia al corte, deformabilidad y permeabilidad controlan el comportamiento de la discontinuidad. El relleno de cada familia de discontinuidades se detalla en la 12.

Tabla 12. Relleno de las familias de discontinuidades de los taludes 1 y 2.

Talud	Sistemas de Discontinuidades	Relleno	Tamaño de Relleno (mm)
1	Familia 1	Sin relleno	-
	Familia 2	Arcillas y limos húmedos	> 5
	Familia 3	Sin relleno	-
2	Familia 1	Arcillas y Limos secos	< 5
	Familia 2	Sin relleno	
	Familia 3	Arcillas y Limos secos	< 5

Fuente: El Autor.

4.2.1.6. Alteración.

En el **Talud 1** se observó que las paredes del macizo rocoso presentan distintas coloraciones debido a las oxidaciones de los minerales que componen la roca. La oxidación de los minerales aumenta por la presencia de agua desde la parte alta hacia la parte baja del talud. Dichas coloraciones son rojizas claras. Se ha clasificado la alteración del macizo como MODERADAMENTE DURA de GRADO III según el **Anexo F**.

En el **Talud 2** contiene se observó la presencia de rocas metamórficas de tipo filitas y esquistos. Las paredes de las discontinuidades presentan un color rojizo anaranjado

diferenciándose del color original de la matriz rocosa. Según el **Anexo F** se la ha clasificado como ALTAMENTE METEORIZADA de GRADO IV.

4.3. Análisis de estabilidad mediante el programa DIPS 6.0.

La pérdida de estabilidad en los Taludes 1 y 2, se debe a la presencia de tres familias de discontinuidades, cuya orientación se detalla en la tabla 8. Esta orientación de cada una de las familias de diaclasas condiciona la presencia de inestabilidad y zonas de rotura. Es por ello que para la identificación de las pérdidas de estabilidad se utilizó la proyección estereográfica en el Software DIPS 6.0 como se muestra en la Figura 10 y 11.

La rotura en cuña es sin duda una de las más comunes en taludes excavados en roca que son fácilmente observables en múltiples carreteras. Están generalmente controladas por dos o más discontinuidades.

Para que se produzca un deslizamiento de la cuña es necesario que la línea de intersección de los planos de discontinuidad tenga menor inclinación que el plano del talud, que aflore en éste y además, que los planos que forman la cuña afloren en el terreno natural.

Para el análisis se sombrea el sector circular comprendido entre la dirección de buzamiento del talud y la línea de intersección entre los planos de discontinuidad. La dirección de la discontinuidad está dentro del sector circular sombreado, por lo tanto, se puede producir el deslizamiento plano a través del otro plano de discontinuidad. (Lain Huerta, 2004).

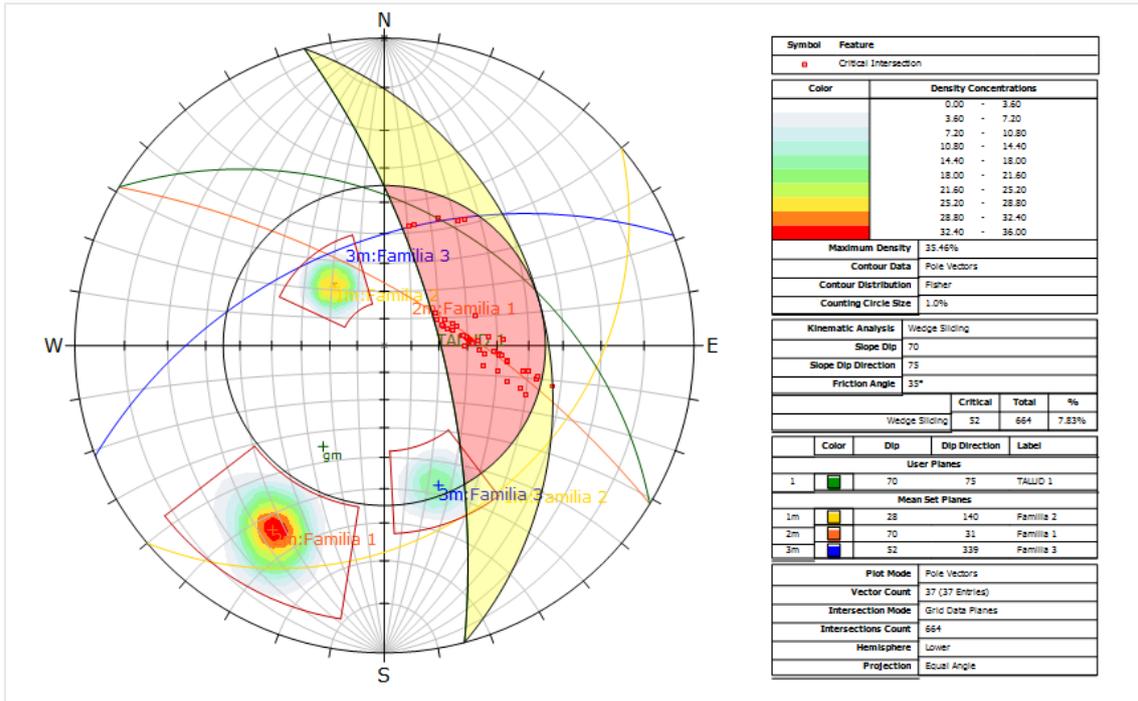


Figura 10. Análisis estereográfico del Talud 1. Rotura en cuña 30 NE.

Fuente: El Autor

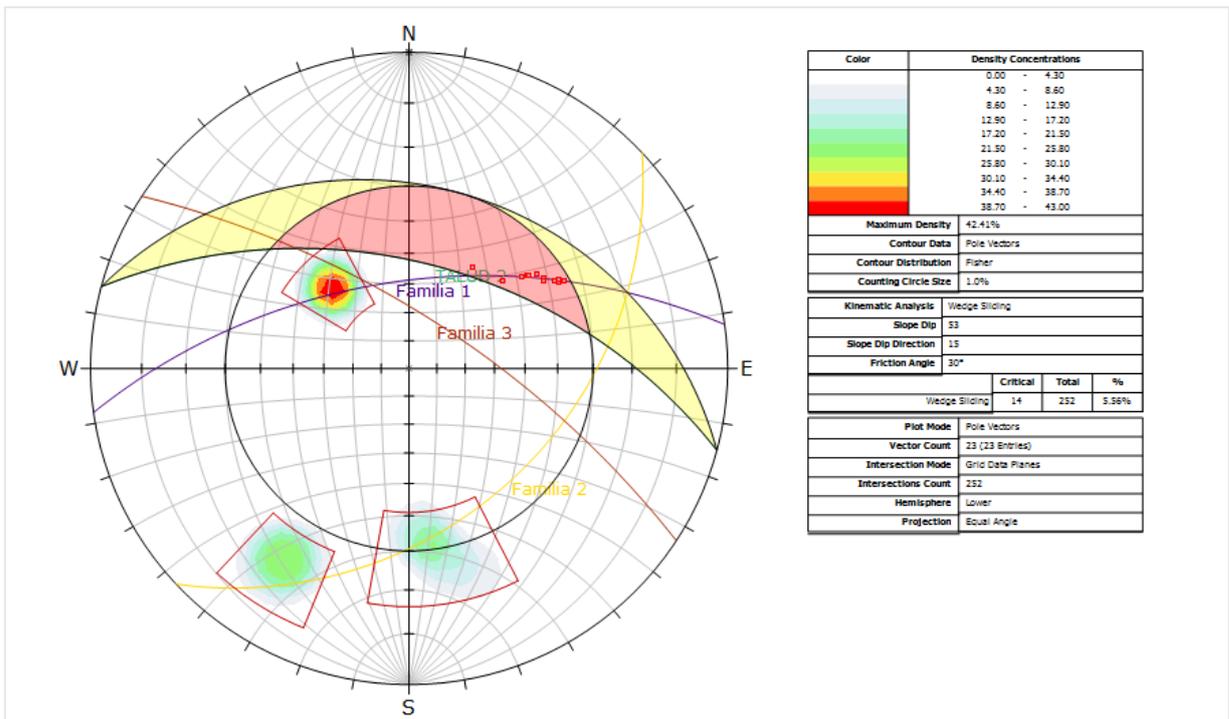


Figura 11. Análisis estereográfico del Talud 2. Rotura en cuña.

Fuente: El Autor.

4.4. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Se muestran los resultados obtenidos por los distintos sistemas de clasificación. Los resultados del Sistema de clasificación Rock Quality Designation se lo ha integrado en los resultados de la clasificación RMR, pues el RQD constituye uno de los cinco parámetros necesarios para obtener la calidad del macizo.

4.4.1. Clasificación RMR.

Los valores de los parámetros necesarios para la determinación de la calidad RMR de la roca se detallan a continuación:

- *Ensayo del Martillo de Schmidt*

Con los datos de rebote obtenidos con el martillo Schmidt sobre las familias de discontinuidades de los Taludes 1 y 2 y mediante el proceso descrito en el Capítulo III se obtuvo la resistencia de compresión simple expresado en Mpa. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros obtenidos a partir del martillo de Schmidt.

	Nº de medidas	Rebote medio del martillo	Densidad (gr/cm3)	Densidad (KN/m3)	Resistencia compresión simple (MPa)
TALUD 1	98	52	2.67	26.18	140
TALUD 2	83	47	2.67	26.18	120

Fuente: El Autor.

- *Índice de calidad de la Roca (RQD).*

Con los datos obtenidos a partir de las mediciones de campo se obtiene:

TALUD 1: Se determinó la presencia de tres familias de discontinuidades, donde:

$$J_v = \frac{nJ_1}{L_1} + \frac{nJ_2}{L_2} + \frac{nJ_3}{L_3} \quad (2.4)$$

$$J_v = \frac{8}{10} + \frac{22}{5.4} + \frac{12}{2.03}$$

$$J_v = 10.79 \frac{\text{Grietas}}{m^3}$$

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

$$RQD = 115 - 3.3 (10.79)$$

$$\mathbf{RQD= 79.41}$$

Se considera la calidad de la roca como **BUENA (79%)**, en base a la clasificación de Deere (1964).

TALUD 2: Se determinó la presencia de tres familias de discontinuidades, donde:

$$J_v = \frac{n^{\circ} J_1}{L_1} + \frac{n^{\circ} J_2}{L_2} + \frac{n^{\circ} J_3}{L_3} \quad (2.4)$$

$$J_v = \frac{12}{3.42} + \frac{22}{2.86} + \frac{9}{3.61}$$

$$J_v = 13.69 \frac{\text{Grietas}}{m^3}$$

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

$$RQD = 115 - 3.3 (13.69)$$

$$\mathbf{RQD= 69.81}$$

Se considera la calidad de la roca como **REGULAR (70%)**, en base a la clasificación de Deere (1964).

- **Espaciado entre discontinuidades**

TALUD 1: El espaciado entre diaclasas para cada familia se detalló en la tabla 8. Considerando como la familia más desfavorable (familia 1) para la estabilidad del talud 1 cuyo espaciado es > 2 m. se le da la valoración de 20.

TALUD 2: Se observa la presencia de tres familias de discontinuidades, de las cuales se consideró la familia más desfavorable (familia 2) para la estabilidad del talud 2. Su espaciado es < 0.06 m. dando así una valoración de 5. Los valores detallados para las otras familias se encuentran en la tabla 8.

- **Condiciones de las discontinuidades**

Las características de las familias de discontinuidades para los Taludes 1 y 2 se encuentran detalladas en la tabla 14 y 15 respectivamente.

Tabla 14. Condiciones de las discontinuidades del Talud 1.

TALUD 1				
Parámetro	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Valoración
Continuidad (m)	3 – 10 m	1-3 m	<1 m	4
Abertura (mm)	>5 mm	< 0.1 mm	>5 mm	3
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	5
Relleno	Blando (> 5 mm)	Sin relleno	Blando (> 5 mm)	1
Alteración	Moderadamente alterada	Muy alterada	Muy alterada	2

Fuente: El Autor.

Tabla 15. Condiciones de las discontinuidades del Talud 2.

TALUD 2				
Parámetro	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Valoración
Continuidad (m)	1-3 m	1-3 m	3 - 10 m	3
Abertura (mm)	1 - 5 mm	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	3
Rugosidad	Ligeramente Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	2
Relleno	Blando (< 5 mm)	Sin relleno	Blando (< 5 mm)	4
Alteración	Moderadamente alterada	Muy alterada	Moderadamente alterada	2

Fuente: El Autor.

- **Agua Subterránea (Nivel Freático).**

Talud 1: Se observa la presencia de agua tipo goteo en las diaclasas de la familia uno y que según el parámetro cinco de la clasificación geomecánica RMR (Bieniawki, 1989) se le da una valoración de 4.

Talud 2: Según Bieniawski, 1989 se la da una valoración de 15, pues el macizo rocoso se encuentra totalmente seco.

La valoración total del RMR básico del Talud 1 es de **68** y la valoración para el Talud 2 es **59**. La valoración total de cada macizo rocoso se encuentra detallada en las tablas 16 y 17.

Tabla 16. Valoración total del Talud 1.

TALUD 1	Puntuación
Resistencia a la compresión uniaxial de la roca	12
RQD	17
Espaciado de las discontinuidades	20
Continuidad	4
Abertura	3
Rugosidad	5
Relleno	1
Alteración	2
Agua Freática	4
RMR básico	68

Fuente: El Autor

El RMR básico obtenido en la Tabla 16 no considera los factores de ajuste para los taludes que se realizarán por la clasificación Romana SMR.

La clasificación Romana define al macizo rocoso en la categoría II, el cual posee las siguientes características:

1. La calidad del macizo rocoso se considera como BUENA.
2. Se estima una cohesión entre 300 – 400 *kPa* y un ángulo de fricción de 35° - 45°.

Tabla 17. Valoración total del Talud 2.

TALUD 2	Puntuación
Resistencia a la compresión uniaxial de la roca	12
RQD	13
Espaciado de las discontinuidades	5
Continuidad	3
Abertura	3
Rugosidad	2
Relleno	4
Alteración	2
Agua Freática	15
RMR básico	59

Fuente: El Autor.

La Tabla 17 no considera los factores de ajuste para los taludes que se realizarán por la clasificación Romana SMR debido a que esta sólo nos proporciona un RMR básico.

La clasificación Romana define al macizo rocoso en la categoría III, el cual posee las siguientes características:

1. La calidad del macizo rocoso se considera como MEDIA.
2. Se estima una cohesión entre 200 – 300 *kPa* y un ángulo de fricción de 25° - 30°.

4.4.2. Clasificación SMR.

La clasificación SMR se obtiene restando del RMR básico los factores de ajuste como se indica en la ecuación 2.5. (Romana, 1985)

La dirección de buzamiento y buzamiento de las familias de las discontinuidades del Talud 1 y 2 se muestran en la tabla 8, con la información descrita en las mismas se ha determinado los factores de ajuste (F_1 , F_2 , F_3); para el factor F_4 en el Talud 1 se consideró el factor de ajuste de Pre-corte, y para el Talud 2 como Natural.

La calidad Buena del macizo rocoso obtenida del índice RMR del Talud 1, al realizar la corrección en las familias se divide en:

Las familias 1, 2 y 3 en la clasificación SMR (Tabla 18) se califican como rocas tipo II de calidad “Buena” y “Estables”.

Tabla 18. Índice "SMR" del Talud 1.

T1	FACTOR DE AJUSTE	VALOR	RESULTADO
Familia 1	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 44^\circ$ Muy Favorable	0.15	SMR= 64 – 3.75 + 10 = 70,25
	F2: $\beta_j = 70^\circ$ Muy desfavorable	1	Tipo de roca: II
	F3: $\beta_j - \beta_i = 0$ Normal	-25	Descripción: Buena
	F4: Pre-corte	10	Estabilidad: Buena
	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 65$ Muy Favorable	0.15	SMR = 60 – 3.6 + 10 = 66.4
Familia 2	F2: $\beta_j = 28$ Favorable	0.40	Tipo de roca: II
	F3: $\beta_j - \beta_i = -42$ Muy desfavorable	-60	Descripción: Buena
	F4: Pre-corte	10	Estabilidad: Buena
F a	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 264$	0,15	SMR = 56 – 1.5 + 10 = 64.5

T1	FACTOR DE AJUSTE	VALOR	RESULTADO
	Muy Favorable		
	F2: $\beta_j = 52$	1	Tipo de roca: II
	Muy desfavorable		
	F3: $\beta_j - \beta_i = -18$	-60	Descripción: Buena
	Muy desfavorable		
	F4: Pre-corte	10	Estabilidad: Buena

Fuente: El Autor

La calidad Media del macizo rocoso obtenida del índice RMR del Talud 2, al realizar la corrección en las familias se divide en: Las familias 1, 2 y 3 en la clasificación SMR (Tabla 19) se califican como rocas tipo II de calidad "Buena" y "Estables".

Tabla 19. Índice "SMR" del talud 2.

T2	FACTOR DE AJUSTE	VALOR	RESULTADO
Familia 1	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 336$	0.15	SMR = $58 - 0.75 + 15 = 72.25$
	Muy Favorable		
	F2: $\beta_j = 60$	1	Tipo de roca: II
	Muy desfavorable		
	F3: $\beta_j - \beta_i = 7$	-5	Descripción: Buena
	Favorable		
	F4: Talud natural	15	Estabilidad: Buena
Familia 2	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 121$	0.15	SMR = $64 - 7.65 + 15 = 71.35$
	Muy Favorable		
	F2: $\beta_j = 38$	0.85	Tipo de roca: II
	Desfavorable		
	F3: $\beta_j - \beta_i = -15$	-60	Descripción: Buena
	Muy desfavorable		
	F4: Talud natural	15	Estabilidad: Buena
Familia 3	F1: $\alpha_i - \alpha_j = 18$	0,70	SMR = $56 + 0 + 15 = 71$
	Normal		
	F2: $\beta_j = 71$	1	Tipo de roca: II
	Muy desfavorable		
	F3: $\beta_j - \beta_i = 18$	0	Descripción: Buena
	Muy favorable		
	F4: Talud natural	15	Estabilidad: Buena

Fuente: El Autor.

4.4.3. Clasificación de Barton, Índice “Q” (1974)

Según (Barton, Lien, & Lunde, 1974) clasifican a los macizos rocosos según el denominado índice de calidad Q, basado en los siguientes seis parámetros:

Tabla 20. Parámetros del Índice "Q" del Talud 1 y 2.

Parámetros	TALUD 1		TALUD 2	
		Valoración		Valoración
Índice de calidad de la Roca (RQD).	80%		70%	
Número de sistemas de fisuras (J_n).	Tres familias de discontinuidades	9	Tres familias de discontinuidades	9
Rugosidad de las fisuras (J_r).	Rugosas irregulares, e onduladas	3	Rugosas e irregulares, onduladas	3
Alteración de las fisuras (J_a).	Arcilla -limosa	3	Arcilla -limosa	3
Factor de reducción por agua en las fisuras (J_w).	Afluencia importante por diaclasas limpias	0.66	Macizo totalmente seco	1
Factor de reducción por esfuerzos (SRF).	Tensiones pequeñas cerca de la Superficie	2.5	Tensiones pequeñas cerca de la Superficie	2.5

Fuente: El Autor.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SFR} \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{80}{9.0} \times \frac{3.0}{3.0} \times \frac{0.66}{2.5}$$

$$Q = 0.264 \text{ Roca muy mala.}$$

$$Q = \frac{70}{9.0} \times \frac{3.0}{3.0} \times \frac{1.0}{2.5}$$

$$Q = 3.11 \text{ Roca Mala.}$$

4.4.4. Clasificación GSI.

Según Gonzalez de Vallejo et al. (2002), la caracterización del macizo rocoso se basa en las descripciones de la calidad del macizo a partir de observaciones geológicas en el campo. Observaciones geológicas de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas.

El valor del Índice GSI (Figura 6) se estima por la siguiente ecuación:

$$GSI = RMR'_{89} - 5$$

$$GSI = RMR'_{89} - 5$$

$$GSI = 68 - 5$$

$$GSI = 59 - 5$$

$$GSI = 63(\text{Talud 1}) .$$

$$GSI = 54(\text{Talud 2})$$

Talud 1: Roca Fracturada en bloques regulares, formadas por tres familias de discontinuidades de condición irregular, superficies lisas, moderadamente alteradas y ligeramente abiertas.

Talud 2: Roca Fracturada en bloques regulares, formadas por tres familias de discontinuidades de condición irregular, superficies lisas, moderadamente alteradas.

La Tabla 21 nos detalla los resultados obtenidos en cada uno de los sistemas utilizados para establecer la calidad de los taludes.

Tabla 21: Resultados de los Sistemas de Clasificación.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	TALUD 1	TALUD 2
RQD	Buena	Irregular
RMR	Buena	Media
SMR	Buena y estable	Buena y estable
GSI	Fracturada e irregular	Fracturada e irregular
Q de Barton	Mala	Muy Mala

Fuente: El Autor.

4.5. Caracterización del movimiento de ladera

El movimiento de ladera del Barrio “La Cisol - Teneria”, vista en planta se asemeja a un óvalo alargado, la longitud total del movimiento es de 1,5 km, un ancho promedio de 400 m, la trayectoria del movimiento tiene una dirección W – E el cual se extiende

desde una altura de 2562 m.s.n.m. (Figura 14) afectando una área de 546 370 m² y un volumen superficial de 6 498 854 m³.

Al movimiento de ladera se lo ha caracterizado como Rotacional de tipo múltiple y activo. Múltiple porque dentro del deslizamiento principal se encuentran otros movimientos de ladera de menor tamaño (Figura 13), y activo porque se observó el levantamiento y agrietamiento de la vía principal Panamericana Sur, fisuras en las casas ubicadas en el pie del deslizamiento y roturas en el canal de agua.

Los principales factores condicionantes se atribuyen a la litología y a la pendiente del terreno comprendida entre 40 – 70° (Fuerte). Mediante observaciones de campo se determinó que los factores detonantes son las precipitaciones y vertientes causando cambios en las condiciones hidrogeológicas de la ladera provocando la desestabilización del terreno (Figura 13). Precipitaciones dadas por el frío y lluvioso clima de la ciudad especialmente en esta área montañosa y que a la vez aumentan el caudal de las vertientes.



Figura 12: A) Escarpe principal del movimiento de ladera de tipo Rotacional. B) y C) Movimientos de ladera múltiples de menor tamaño.

Fuente: El Autor.

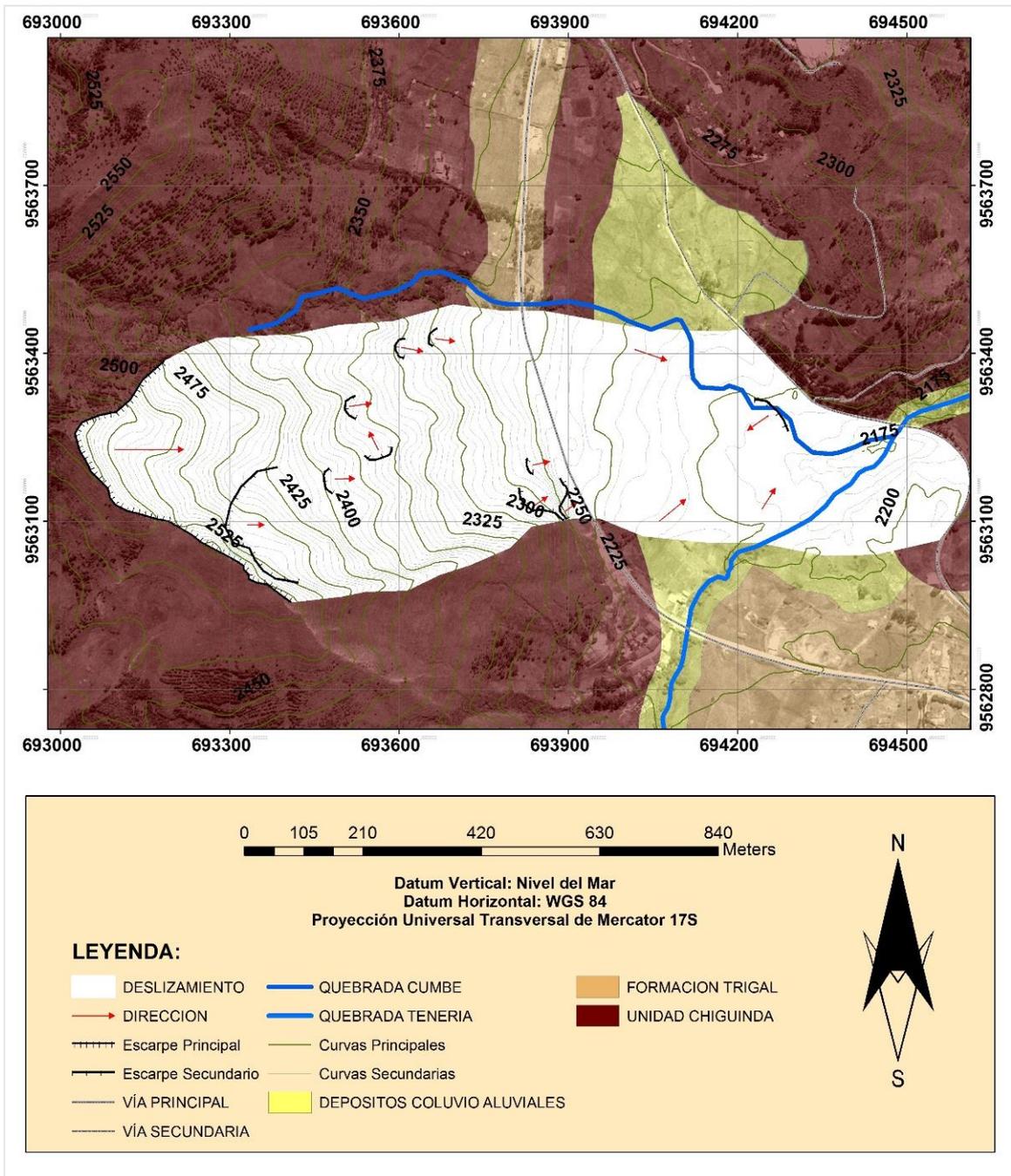


Figura 13. Mapa del Movimiento de ladera en la zona de estudio.

Fuente: El Autor.

CONCLUSIONES

Las familias de discontinuidades presentes en los taludes uno y dos, constituyen la principal forma de pérdida de estabilidad debido a la formación de cuñas. En el Talud uno el tipo de rotura es en Cuña, 30°NE. Y la rotura del talud dos es de igual manera en Cuña; solo que esta se clava en el talud hacia NE por lo que podemos decir que su estabilidad es buena.

La zona de estudio ubicada en su mayor parte (77%) en el basamento de la cuenca de Loja, se encuentra geológicamente conformada por esquistos y filitas de la formación Chuiguinda, Coluviales de Edad Cuaternario y conglomerados de la formación El Trigal.

En el Talud 1 se identificaron tres familias de diaclasas, cuyas orientaciones predominantes en cada sistema son: Familia uno 31°/71°, familia dos 140°/28° y familia tres 339°/52. Así mismo en el Talud 2 se observaron tres sistemas de diaclasas cuyas orientaciones son: Familia uno 352°/59°, la familia dos 137°/39° y la familia tres 33°/71°.

La clasificación de Deere "RQD" clasifica la calidad del talud uno como **BUENA**. La clasificación de Bienawski, "RMR", clasifica la calidad del talud uno como **BUENA**. El Índice de Romana "SMR", lo clasifica la calidad como **BUENA** y **ESTABLE** y GSI "Índice de resistencia Geológica", clasifica la calidad del macizo como **FRACTURADA** e **IRREGULAR**. Estas cuatro clasificaciones clasifican al talud uno con una calidad **BUENA** y un comportamiento **ESTABLE**. Para el talud dos, la clasificación de Deere "RQD" lo clasifica como irregular. Bienawski "RMR", clasifica la calidad como **MEDIA**. El Índice de Romana "SMR", como **BUENA** y **ESTABLE**; y GSI como **FRACTURADA** e **IRREGULAR**. Estas cuatro clasificaciones clasifican al talud dos con una calidad **MEDIA** con un comportamiento **ESTABLE**.

Los resultados obtenidos en el Sistema "Q" de Barton no se los pone a comparación con las clasificaciones antes nombradas, debido a que sus resultados no se asemejan con ninguna de estas clasificaciones.

El movimiento de ladera ha sido identificado como de tipo Rotacional de tipo múltiple atribuyéndose a la litología y pendiente del terreno como principales factores condicionantes. Y un factor detonante es la precipitación y con ello la escorrentía que provoca sobre saturación de los terrenos y con ello la desestabilización de la ladera, que lo convierte en activo cada vez que se dan precipitaciones intensas, ocasionando daños estructurales en viviendas y vías.

RECOMENDACIONES

El GAD de Loja incluya planes de ordenanza territorial asociados con la gestión de riesgos geológicos provocados por la inestabilidad de taludes y movimientos de ladera, puesto que la geología de Loja es propensa a sufrir estos fenómenos, con la finalidad de asegurar los futuros proyectos civiles e infraestructura.

Se considera factible aplicar un sistema de monitoreo en la zona que se encuentran activas para determinar la velocidad con la cual se desplaza el movimiento.

Realizar drenes superficiales para prevenir la erosión e infiltración del agua además del mejoramiento de los canales reduciendo la inestabilidad del terreno.

Realizar un plan de explotación para el Talud 1, que disminuya el grado de inestabilidad y un estudio de las vibraciones que provocan los vehículos pesados que circulan por la vía principal.

BIBLIOGRAFÍA

- Babín Vich, R., & Gómez Ortiz, D. (2010). Serie Geológica Estructural. En *Problemas de Geología Estructural: Rotaciones* (págs. 57-72). Madrid: Reduca.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the design of tunnel support*. Rock mechanics.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Cuenca Ojeda, L. A. (30 de Junio de 2009). *Loja Ciudad Turística*. Obtenido de <https://dabloja70.wordpress.com/2009/06/30/hidrografia-3/>
- Deere, D. (1967). *Technical description of rock cores for engineering purposes*, Rock mech. and Eng. Geology.
- DIPS. (2016). Madrid: ROCSCIENCE. (s.f.).
- Gonzalez de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Guamán Jaramillo, G. (Agosto de 2012). APLICACIÓN DE SIG PARA EL MANEJO DE RIESGOS. (Tesis de pregrado).
- Hungerbuhler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egeuz, A., Peterson, D. E., . . . Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth Science Reviews*, 90-93.
- Lain Huerta, R. (2004). *Mecánica de Rocas*. Madrid.
- Nañón Blázquez, I. (2000). *Manual de Carreteras*. Madrid: Enrique Ortiz e Hijos, Contrastista de Obras, S.A.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO LOJA*. Loja: PNUMA.
- Romana, M. (1985). *Nuevos factores de ajuste para la clasificación de Bieniawski a los taludes*. Barcelona.

Soto, J. (2010). *Análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante el método de la matriz en un GIS: aplicación a la cuenca de Loja en el Sur del Ecuador. Tesis de Master.* España: Universidad de Granada.

Suarez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos - Análisis Geotécnico* (Vol. 1). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Universidad de Córdoba Área de Laboratorio de Geotecnia. (2010). *GEOTECNIA I.* Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

ANEXOS

Anexo A: Clasificación "RMR" Bieniaswki (1989)

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)										
Parámetros de clasificación										
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1	
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			
	Puntuación		20	17	13	6	3			
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m			
	Puntuación		20	15	10	8	5			
4	Estado de las diaclasas	Continuidad		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación		6	4	2	1	0		
		Abertura		Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Relleno		Ninguno	Duro (< 5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (< 5 mm)	Blando (> 5 mm)		
		Puntuación		6	4	2	2	0		
		Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación		6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			
		Relación: Presión de agua/Tensión	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5			
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo			
	Puntuación		15	10	7	4	0			

Clasificación del macizo rocoso según RMR					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Corrección por la Orientación de las Diaclasas					
Dirección y Buzamiento	Muy Favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Túneles	0	-2	-5	-10	-12
Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Orientación de las Diaclasas						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20° cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz 45°-90°	Buz 20°-45°	Buz 45°-90°	Buz 20°-45°	Buz 20°-90°	Buz 20°-45°	
Muy Favorables	Favorables	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

Clasificación del macizo rocoso según RMR					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Anexo B. Clasificación “SMR” Romana (1989)

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	30 - 20°	20 - 10°	10 - 5°	$<5^\circ$
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
W		$ \alpha_j - \alpha_s $					
P/T/W	F1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j $	$<20^\circ$	20 - 30°	30 - 35°	35 - 45°	$>45^\circ$
P/W		F2		0.15	0.40	0.70	0.85
T	1.00						
P	C	$ \beta_j - \beta_s $	$>10^\circ$	10 - 0°	0°	0 - (-10°)	$<(-10^\circ)$
W		$ \beta_j - \beta_s $					
T		$ \beta_j + \beta_s $					
P/T/W	F3		0	-6	-25	-50	-60
MÉTODO DE EXCAVACIÓN (F4)							
Talud natural			15	Voladura normal o excavación mecánica			0
Precorte			10	Voladura deficiente			-8
Voladura suave			8				

- P:** Rotura planar
- T:** Rotura en vuelco
- W:** Rotura en cuña
- α_j :** Dirección de buzamiento de las juntas
- α_s :** Dirección de buzamiento del talud
- β_j :** Buzamiento de las juntas
- β_s :** Buzamiento del talud

Anexo C. Clases de estabilidad. (Romana, 1985)

Caso	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 180	81 - 100
Descripcion	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	Buena	Muy Buena
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por malla	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Re-excavacion	Corrección	Sistematico	Ocacional	Ninguno

Anexo D. Parámetros individuales usados en el sistema Q

Indice de Diaclasado	Jn	Valor
Roca Masiva		0,5 - 1
Una familia de diaclasas		2
Idem con otras diaclasas ocasionales		3
Dos familias de diaclasas		4
Idem con otras diaclasas ocasionales		6
Tres familias de diaclasas		9
Idem con otras diaclasas ocasionales		12
Cuatro o mas familias, roca muy fracturada		15
Roca triturada		20

Indice de Rugosidad	Jr	Valor
Diaclasas rellenas		1
<i>Diaclasas limpias:</i>		
<i>Discontinuas</i>		4
Onduladas rugosas		3
Onduladas lisas		2
Planas rugosas		1,5
Planas lisas		1
<i>Lisos o espejos de falla</i>		
Ondulados		1.5
Planos		0.5

Indice de Alteracion	Ja	Valor
<i>Diaclasas de paredes sanas</i>		0,75 - 1
<i>Ligera alteracion</i>		2
<i>Alteraciones arcillosas</i>		4
<i>Con detritos arenosos</i>		4
<i>Con detritos arcillosos preconsolidados</i>		6
<i>Idem poco consolidados</i>		8
<i>Idem expansivos</i>		8 - 12
<i>Milonitos (productos de trituración) de roca y arcilla</i>		6 - 12
<i>Milonitos de arcilla limosa</i>		5
<i>Milonitos arcillosos gruesos</i>		10 - 20

Coficiente reductor por la presencia de agua	Jw	Presión de agua [Kg/cm2]	Valor
Excavaciones secas a con < 5 l/min localmente		<1	1
Afluencia media con lavado de algunas diaclasas		1 - 2,5	0,66
Afluencia importante por diaclasas limpias		2,5 - 10	0,5
Idem con lavado de diaclasas		2,5 - 10	0,33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo		> 10	0,2 - 0,1
Idem mantenida		> 10	0,1 - 0,05

Parámetro SRF	Valor
<i>Zonas débiles</i>	
Multitud de zonas débiles	10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50 m)	5
Idem con cobertura > 50 m.	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50 m)	5
Idem con cobertura > 50 m	2,5
Terreno en bloques muy fracturado	5
<i>Roca competente</i>	
Pequeña cobertura ($\sigma_c / \sigma_1 > 200$)	2,5
Cobertura media ($200 > \sigma_c / \sigma_1 > 10$)	1
Gran cobertura ($10 > \sigma_c / \sigma_1 > 5$)	0,5 - 2,0
<i>Terreno fluyente</i>	
Con bajas presiones	5 - 10
Con altas presiones	10 - 20
<i>Terreno expansivo</i>	
Con presión de hinchamiento moderada	5 - 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Anexo E: Clasificación Q de Barton

0.001 y 0.01	Roca excepcionalmente mala
0.01 y 0.1	Roca extremadamente mala
0.1 y 1	Roca muy mala
1 y 4	Roca mala
4 y 10	Roca media
10 y 40	Roca buena
40 y 100	Roca Muy buena
100 y 400	Roca extremadamente buena
400 y 1000	Roca excepcionalmente buena

Anexo F. Parametros para la descripción de macizos rocosos según González de Vallejo et al. (2002).

Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso		
Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

(ISRM, 1981).

Anexo G. Cálculo de la resistencia a partir del martillo de Schmidt.

